



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Diogo Filipe Santos Malaquias Botas Lino

Sistemas de Propulsão Elétrica - Estudo de Viabilidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha

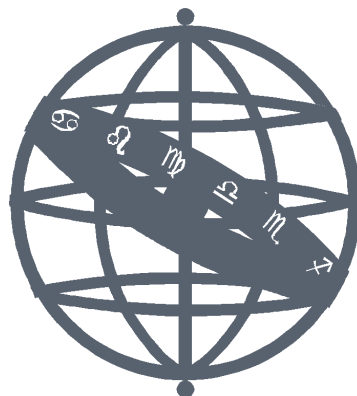


Alfeite
2021



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Diogo Filipe Santos Malaquias Botas Lino

Sistemas de Propulsão Elétrica - Estudo de Viabilidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha

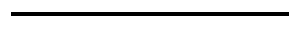
Orientação de: CFR EN-MEC Suzana da Silva Lampreia

O Aluno Mestrando,



Diogo Lino

O Orientador,



Suzana Lampreia

Alfeite
2021

«It is paradoxical, yet true, to say, that the more we know, the more ignorant we become in the absolute sense, for it is only through enlightenment that we become conscious of our limitations. Precisely one of the most gratifying results of intellectual evolution is the continuous opening up of new and greater prospects.»

Nikola Tesla

À minha família e à minha namorada, pelo amor e pelo apoio incondicional no decorrer deste longo percurso, na esperança de poder compensar todos os momentos de ausência.

Agradecimentos

Perante o expoente do percurso académico de um oficial de marinha, a conclusão da dissertação de mestrado, apresento o meu apreço e sinceros agradecimentos aos demais que contribuíram para que a minha dedicação à sua elaboração pudesse culminar nos resultados por mim desejados.

À CFR EN-MEC Suzana Lampreia, pela honra da disponibilidade que sempre demonstrou e pela partilha dos seus valiosos conhecimentos, preponderantes no processo analítico e conclusivo da elaboração da dissertação.

A toda a guarnição do NRP *D. Carlos I* pela excelência de bases de conhecimento prático transmitidos no decorrer do período do estágio de embarque, concomitantemente aos seus indubitáveis valores de camaradagem.

Ao meu curso, curso CTEN Raúl Alexandre Cascais, pela camaradagem, amizade e abnegação que sempre me brindaram ao longo destes cinco anos.

À minha família e amigos, e em especial aos meus pais e à minha avó, que sempre se mantiveram na retaguarda de todos os meus objetivos, constituindo-se uma base sólida e fundamental no sucesso de todas as minhas conquistas.

Resumo

A sustentabilidade da vida humana no planeta é um tema que tem tido um crescimento exponencial, a par da tecnologia associada à mitigação da emissão de gases com efeito de estufa e de exploração de recursos naturais, mas também com as crescentes políticas restritivas nesta matéria, prevê-se, com cada vez mais certeza, que o único caminho a adotar será o da convergência com todos estes valores.

A principal finalidade desta dissertação passou por estudar a viabilidade da implementação de sistemas de propulsão 100% elétrica no setor naval, quais as suas vantagens operacionais quando comparados com os sistemas convencionais e quais as perspectivas de futuro desta tecnologia. Para responder a estas questões foram estudadas diversas implementações de sucesso, tanto em projetos civis, como os mais recentes desenvolvimentos tecnológicos aplicados a navios combatentes - enquadrando as particularidades operacionais de cada tipo de missão e estudando as limitações que têm vindo a colocar em causa o seu correto estabelecimento. Foram aplicados questionários de opinião junto dos próprios utilizadores dos sistemas de propulsão elétrica que, após uma análise de capacidades internas e externas e de alguma inferência estatística, permitiram concluir que, apesar de em determinado tipo de navios ser ainda necessário ultrapassar alguns constrangimentos de projeto para conseguir beneficiar das suas vantagens operacionais, noutros a sua utilização representa já uma peça-chave com inúmeras vantagens para o cumprimento da missão atribuída.

Palavras-chave: Emissões Poluentes, Propulsão Elétrica, Soluções Híbridas, Baterias, Segurança

Abstract

The sustainability of human life on the planet is an issue that has had an exponential growth, along with the technology associated with the mitigation of greenhouse gas emissions and the exploitation of natural resources, but also with the increasing restrictive policies in this area, it is expected, with increasing certainty, that the only way to adopt will be convergence with all these values.

The main purpose of this dissertation was to study the feasibility of implementing full-electric propulsion systems in the naval sector, what are its operational advantages when compared to conventional systems and what are the future trends in this technology. To answer these questions, several successful implementations have been studied, both in civil projects, as well as the latest technological developments applied to warships - framing the operational particularities of each type of mission and studying the limitations that have been called into question their correct establishment. Questionnaires were applied to the users of the electric propulsion systems themselves, which, after an analysis of internal and external capacities and some statistical inference, allowed us to conclude that, although in a certain type of ships it is still necessary to overcome some design constraints in order to benefit from their operational advantages, in others their use is already a key part with numerous advantages for the fulfillment of the mission assigned.

Keywords: Polluting Emissions, Electric Propulsion, Hybrid Solutions, Batteries, Safety

Índice

| | |
|---|-----------|
| Introdução | 1 |
| 1 Propulsão Elétrica | 9 |
| 1.1 Redução da emissão de poluentes | 9 |
| 1.2 Legislação | 9 |
| 1.2.1 Acidificação dos oceanos | 11 |
| 1.2.2 Combustíveis com baixo teor de enxofre | 12 |
| 1.2.3 Sistemas scrubber húmidos | 13 |
| 1.2.4 Scrubber seco de membrana cerâmica | 14 |
| 1.2.5 Redução seletiva não-catalítica | 15 |
| 1.2.6 Redução seletiva catalítica | 15 |
| 1.2.7 Recirculação dos gases de escape | 16 |
| 1.2.8 Célula de Combustível | 18 |
| 1.3 Promoção da inovação e estímulo ao desenvolvimento | 20 |
| 1.3.1 Sistemas de armazenamento de energia com recurso a baterias | 21 |
| 1.3.2 Baterias de iões-lítio | 21 |
| 1.4 Sistemas de propulsão elétrica na Marinha Mercante | 22 |
| 1.5 Sistemas de propulsão elétrica em Navios Combatentes | 26 |
| 1.5.1 Sistemas de propulsão elétrica na Marinha Portuguesa . . . | 27 |
| 2 Vantagens na adoção de sistemas de propulsão elétrica | 31 |
| 2.1 Redução do consumo de combustível | 31 |
| 2.2 Flexibilidade de projeto | 32 |
| 2.3 Redução dos custos operacionais e de manutenção | 32 |
| 2.4 Redução da emissão de poluentes | 33 |
| 2.5 Redundância de sistemas | 33 |
| 2.6 Redução da assinatura acústica | 33 |
| 2.7 Flexibilidade na distribuição de potência após a deteção de anomalias | 34 |
| 2.8 Aumento da capacidade de sobrevivência do navio | 34 |
| 2.9 Aumento da manobrabilidade | 35 |
| 2.10 Redução da guarnição | 35 |
| 3 Novas perspectivas de propulsão | 37 |
| 3.1 Principais desafios na adoção de sistemas de propulsão 100% elétricos | 37 |
| 3.1.1 Densidade energética dos módulos de baterias | 40 |
| 3.1.2 Motores síncronos de ímanes permanentes | 41 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Análise Estatística | 43 |
| 4.1 | Amostragem | 43 |
| 4.2 | Consistência e fiabilidade dos dados | 44 |
| 4.3 | Caracterização da amostra | 45 |
| 4.4 | Análise de resultados | 47 |
| 4.4.1 | Análise SWOT | 47 |
| | Conclusão | 57 |
| | Bibliografia | 59 |
| | Apêndices | 65 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | Histórico da diferença de temperaturas comparando com a década de referência de 1990 (Lindsey & Dahlman, 2021) | 1 |
| Figura 2 | Linhas de evolução necessárias para manter o aumento da temperatura média do planeta abaixo do 1,5°C, tendo em conta o esforço por parte da sociedade. (IPCC, 2021) | 2 |
| Figura 3 | Meta Global para atingir as emissões-zero(Levin & Davis, 2019) | 3 |
| Figura 4 | Taxa de crescimento do transporte de mercadorias via marítima(Profillidis & Botzoris, 2019a) | 5 |
| Figura 5 | Evolução do tráfego de mercadorias via marítima(Profillidis & Botzoris, 2019a) | 6 |
| Figura 6 | Evolução da Acidificação dos Oceanos na Estação de Aloha, Arquipélago do Hawai (Feely, Doney & Cooley, 2009) | 12 |
| Figura 7 | Emission Control Areas (2020) (DNV-GL, 2016) | 13 |
| Figura 8 | Scrubber de Membrana Cerâmica, desenvolvido pela IONADA (Carter & Panziera, 2015) | 15 |
| Figura 9 | Esquemática de funcionamento de um equipamento de redução seletiva não-catalítica | 16 |
| Figura 10 | Esquemática de funcionamento de um equipamento de redução seletiva catalítica | 16 |
| Figura 11 | Sistema Scrubber com um EGR acoplado | 17 |
| Figura 12 | Princípio de funcionamento de uma célula de combustível (Leite, 2020) | 20 |
| Figura 13 | Pack de bateria Rolls-Royce a bordo de um navio SeaCosco (DNV-GL, 2021) | 22 |
| Figura 14 | Viking Lady, navio utilizado na colaboração para o desenvolvimento do projeto FellowSHIP (Bjorn-Johan, Sverre & Oystein, 2017) | 23 |
| Figura 15 | MF Ampere a navegar nos Fiordes (Wu & Bucknall, 2016) . . | 24 |
| Figura 16 | Yara Birkeland atracado no porto de Horten, Noruega (Marine Traffic, 2021) | 25 |
| Figura 17 | HMS Duncan, último navio da Classe Daring a ser comissionado (Reuters, 2016) | 26 |
| Figura 18 | NRP <i>Tridente</i> (Marinha Portuguesa, 2021b) | 27 |
| Figura 19 | Esquema simplificado da Instalação Propulsora e de Produção de Energia do NRP <i>D. Carlos I</i> (Ramalho Marreiros & Brandão Correia, 2008) | 28 |
| Figura 20 | NRP <i>D. Carlos I</i> (Marinha Portuguesa, 2021a) | 28 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 21 | Instalação Propulsora dos navios da classe «Viana do Castelo» (Marinha Portuguesa & Equipa de Acompanhamento e Fiscalização dos Navios de Patrulha, 2020) | 29 |
| Figura 22 | NRP <i>Viana do Castelo</i> (Marinha Portuguesa, 2021a) | 30 |
| Figura 23 | Evolução do número de navios que utilizam baterias como fonte de energia e Encomendas (EMSA, 2020) | 38 |
| Figura 24 | Evolução do custo de produção de Baterias desde o ano de 2005 com previsão a 10 anos (Bjorn-Johan, Sverre & Oystein, 2017) | 40 |
| Figura 25 | Frequência de Respostas por tipo de Navio | 46 |
| Figura 26 | Representação da Idade dos Entrevistados | 46 |
| Figura 27 | Perfil de Utilização do Sistema | 47 |
| Figura 28 | «Considera a Propulsão Elétrica uma mais valia na missão do seu navio?» | 50 |
| Figura 29 | Utilidade do Sistema de Propulsão elétrica, por Tipo de Navio. | 50 |
| Figura 30 | Opinião de utilidade do Sistema de Propulsão Elétrica, por grau de utilização do mesmo | 51 |
| Figura 31 | Condicionantes à utilização dos Sistemas de Propulsão Elétrica | 52 |
| Figura 32 | Regimes de Velocidade identificados por Operadores dos Navios de Patrulha Oceânica | 53 |
| Figura 33 | «Quais as principais vantagens na utilização da Propulsão Elétrica no seu navio?» | 53 |
| Figura 34 | «Qual a maior vantagem da propulsão Elétrica?» | 54 |
| Figura 35 | «Considera a propulsão elétrica o futuro?» | 55 |
| Figura 36 | Projeto de Implementação de um Pack de Baterias Rolls-Royce num navio de Apoio Logístico (DNV-GL, 2021) | 58 |
| Figura S1 | Matriz de Correlação entre Itens. Obtido através de (SPSS, 2021) | 73 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela 1 | Emissões Específicas dos diversos tipos de transporte de mercadoria (IMO, 2006) | 4 |
| Tabela 2 | Matriz de análise SWOT, adaptado de (Antunes, 2014; Valentin, 2001) | 7 |
| Tabela 3 | Comparação de eficácia das diferentes técnicas de redução de poluentes, comparando com a utilização de HFO (Carter & Panziera, 2015; Sentís, 2012) | 17 |
| Tabela 4 | Tabela Comparativa dos diferentes sistemas de Tratamento de Gases e Produtos de Evacuação (Sentís, 2012) | 18 |
| Tabela 5 | Comparativo entre Motor de Indução e Motor Síncrono de Ímãs Permanentes (Melo, 2017) | 41 |
| Tabela 6 | Consistência dos Dados segundo o cálculo do Coeficiente Alfa de Cronbach | 44 |
| Tabela A1 | Matriz de validação dos Questionários efetuados | 70 |
| Tabela A1 | Matriz de análise SWOT adaptada | 71 |

Nomenclatura

Abreviaturas

$(NH_2)_2CO$ Amoníaco

$Ca(OH)_2$ Hidróxido de Cálcio

CO_2 Dióxido de Carbono

H_2 Água

$NaOH$ Hidróxido de Sódio

NH_3 Amoníaco

NO_x Óxidos de Nitrogénio

O_2 Oxigénio

SO_2 Dióxido de Enxofre

SO_x Óxido de Enxofre

AC Corrente Alternada

HFO Heavy Fuel Oil

LSFO Low Sulfur Fuel Oil

MEPC Marine Environment Protection Committee

MIO Maritime Interdiction Operations

PM Material Particulado

PMB Produto Mundial Bruto

SWOT Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats

Acrónimos

AZIPODS Propulsor Azimutal

| | |
|--------|--|
| ECA | Emission Control Areas |
| IMO | International Maritime Organization |
| MARPOL | Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição dos Navios no Mar |
| METOC | Condições Meteoceanográficas |
| NATO | North Atlantic Treaty Organisation |
| PIB | Produto Interno Bruto |

Símbolos

| | |
|---------|---|
| AIP | Air Independent Propulsion |
| ASW | Anti-Submarine Warfare |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| CII | Carbon Intensity Indicator |
| CODELOD | Combined Diesel Electric Or Diesel |
| EEDI | Energy Efficiency Design Index |
| EGR | Exhaust Gas Recirculation |
| EGR | Exhaust Gas Recirculation |
| ESS | Energy Storage System |
| ETA | Estimated Time Arrival |
| IFEP | Sistema Integrado de Propulsão Elétrica |
| LNG | Gás Natural Liquefeito |
| PEBB | Power Electronics Building Blocks |
| SCR | Selective Catalytic Reduction |
| SCR | Selective Catalytic Reduction |
| SNCR | Selective Non-Catalytic Redution |
| SNCR | Selective Non-Catalytic Redution |
| USNA | United States Naval Academy |
| XX | |

Introdução

Enquadramento

As alterações climáticas desempenham um papel preponderante na consciencialização de um mundo em clara mudança, representando um enorme catalisador na imposição de restrições relacionadas com a emissão de gases poluentes para a atmosfera. Estas restrições têm vindo a impulsionar a tecnologia no sentido de se tornar mais verde e respondendo, não só às limitações impostas sobre o setor industrial, mas impulsionando também o consumo sustentável com o objetivo de atingir a neutralidade carbónica.

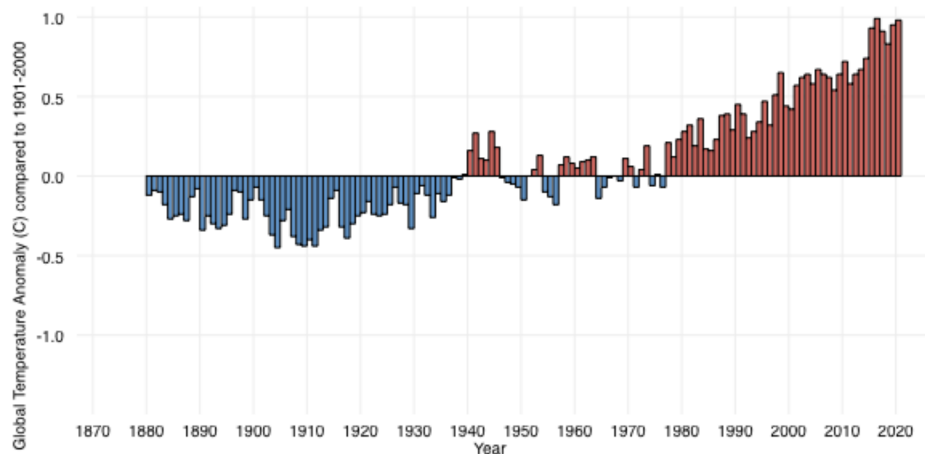


FIGURA 1: Histórico da diferença de temperaturas comparando com a década de referência de 1990 (Lindsey & Dahlman, 2021)

Com previsões a sugerir um aumento de até 30% da totalidade das emissões específicas de gases poluentes atribuídos à indústria marítima (Walker et al., 2018), e com uma evolução desenfreada nos valores das temperaturas médias observadas na superfície da terra - com os seus 10 anos mais quentes registados até hoje situando-se na última década, superando a cada ano os valores máximos - torna-se cada vez mais essencial conseguir uma resposta efetiva que corresponda a todas as expectativas mais ambiciosas para este setor. As consequências a longo termo da falta de formação cívica ambiental, com uma despreocupação pela implementação de políticas ambientais, têm sido cada vez mais severas, alicerçadas num crescimento exponencial do número de trocas comerciais por todo o globo (Roh et al., 2019).

Urge a necessidade de desenvolver e aprimorar técnicas e políticas ambientais, nomeadamente no setor dos transportes marítimos que representam, em si, um grande protagonista nesta mudança.

Com a aproximação do planeta do ponto de não retorno, importa cada vez menos saber qual a quantidade de esforços necessários para travar este aumento de temperatura de $1,5^{\circ}\text{C}$, mas sim efetuar todos os esforços possíveis para que o planeta consiga manter o seu natural equilíbrio térmico.

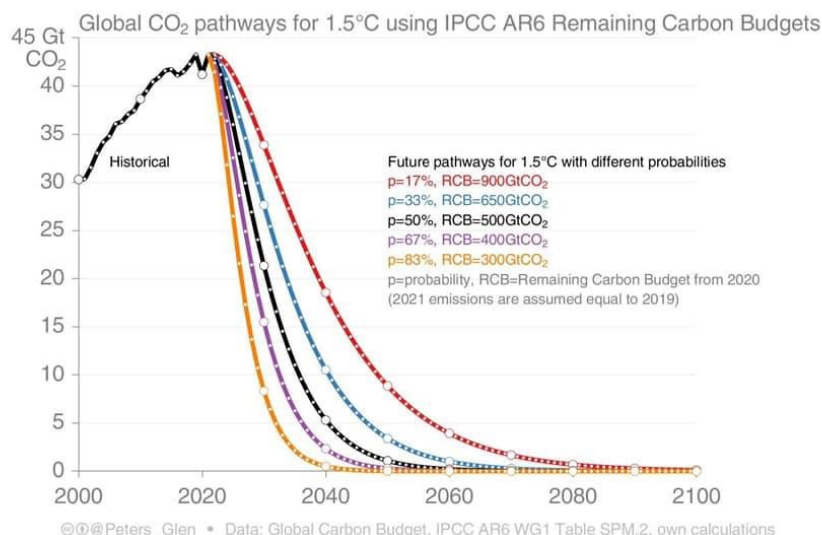


FIGURA 2: Linhas de evolução necessárias para manter o aumento da temperatura média do planeta abaixo do $1,5^{\circ}\text{C}$, tendo em conta o esforço por parte da sociedade. (IPCC, 2021)

No setor dos navios combatentes existem soluções que caminham no sentido da implementação de sistemas de propulsão elétrica a bordo - sabendo-se que a propulsão elétrica é normalmente utilizada a baixas velocidades, privilegiando a redução da assinatura acústica ou do consumo de combustível - no entanto, por razões que serão abordadas, estes sistemas continuam a ser postos de lado em detrimento dos sistemas de propulsão convencionais diesel.

Com o objetivo de compreender o grau de utilização dos sistemas de propulsão elétrica na Marinha Portuguesa e em Marinhas aliadas, formulando um modelo de otimização da utilização destes sistemas, irão ser realizados questionários junto de guarnições escolhidas de acordo com a tipologia do navio e respetivo tipo de missão. Serão estudados casos de sucesso implementados em diferentes setores marítimos e de como estes poderão pautar o desenvolvimento de sistemas idênticos e adaptados à missão de navios com diferentes perfis operacionais.

O desenvolvimento de novos sistemas de armazenamento de energia tem vindo a ganhar o seu espaço na construção naval e irá permitir implementar um novo paradigma na indústria dos transportes via marítima, dando uma resposta eficaz às restrições impostas pelas entidades reguladoras e pelas sociedades classificadoras,

e caminhando, cada vez mais, no sentido de cumprir com o modelo de Net-Zero Greenhouse Gas Emissions, visado por 196 países no Acordo de Paris, em 2015.

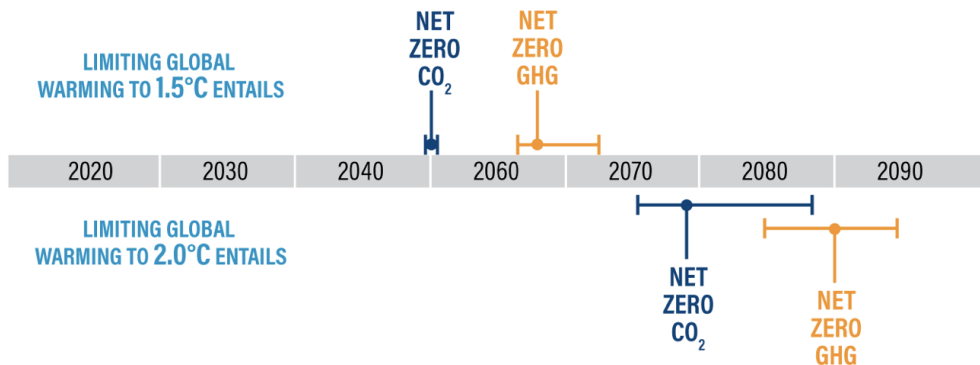


FIGURA 3: Meta Global para atingir as emissões-zero(Levin & Davis, 2019)

A utilização da propulsão elétrica em navios não representa, contudo, uma tecnologia recente. É no séc.XIX que aparecem, na Rússia, os primeiros sistemas de propulsão elétrica, usados maioritariamente para transportes de passageiros de curta duração, utilizando pequenos módulos de baterias como fonte de energia.

Entre 1911 e 1913 é estabelecido um marco importante no desenvolvimento destes sistemas com a reconversão do navio graneleiro USS Jupiter. Este navio, equipado com um sistema de propulsão turbo-elétrico, torna-se o primeiro porta-aviões da Marinha Americana que, graças aos avanços tecnológicos, conseguia alimentar dois motores elétricos de indução através de um turbogerador em corrente alternada (AC) , com uma potência combinada de 5500 cv. Devido ao sucesso desta implementação, o mote seria dado para a construção de vários navios com sistemas de propulsão elétrica, sendo ela alimentada por turbo-geradores ou por geradores diesel, nos anos que se seguiram. (Pereira, 2007)

Motivação do estudo

Emissões de Poluentes nos Transportes Marítimos

O setor marítimo é parte integrante da indústria dos transportes, sendo responsável por, aproximadamente, 65% do valor económico e de 90% de todas as transações comerciais efetuadas globalmente, em tonelagem, comportando um peso de 14% do total das emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera, tornando-se na quarta maior indústria poluente a nível global atingindo, em 2015, a meta das 10 mil milhões de toneladas de mercadoria transportadas.

O grande poluidor

Uma das grandes questões que se coloca hoje em dia, é a de que em que medida são, na verdade, os grandes navios de mercadorias os maiores percutores das emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera.

Apesar deste setor um dos grandes poluidores à escala mundial, a verdade é que o transporte de bens e materiais via marítima apresenta as melhores taxas de eficiência energética, por quilograma de material, devido à sua elevada capacidade de carga, com um valor médio de emissões específicas de Dióxido de Carbono por tonelagem por quilómetro de 8g. Esta carga, quando chega ao porto e necessita ser transportada para os respetivos centros de distribuição tem, à partida, uma quebra de eficiência energética de cerca de 400%, se a distribuição for efetuada por ferrovia, o segundo meio de transporte mais eficiente.(Koumentakos, 2019; Walker et al., 2018)

TABELA 1: Emissões Específicas dos diversos tipos de transporte de mercadoria (IMO, 2006)

| | Marítimo | Férreo | Rodoviário | Aéreo |
|-------------|----------|--------|------------|-------|
| $CO_2/t.km$ | 8g | 35g | 110g | 665g |

A competitividade do mercado, que tem feito reduzir os seus custos de transporte, tem alicerçado um crescimento tendencial da quota de mercado do setor marítimo dos transportes a um ritmo de 2%/ano mas a verdade é que, na última década temos assistido a uma redução das emissões globais de dióxido de carbono à taxa de 1%/ano. (Nations, 2019; Ocean & Climate Platform, 2021)

Estas melhorias no setor devem-se a uma série de questões que irão ser abordadas mais adiante neste capítulo mas que passam, maioritariamente, pelo aumento da pressão por parte das entidades reguladoras e pelas sociedades classificadoras, que têm restringido ao longo dos últimos anos, não só as medidas de eficiência energética dos navios em operação, mas também têm elevado os standards da construção de novos navios.

Liberalização do setor dos transportes marítimos

O setor marítimo apresenta-se, desde sempre, como o setor dos transportes que mais se liberalizou, quer pela rápida necessidade de dar resposta a uma enorme procura de produtos originários dos quatro cantos do mundo - numa busca incessante pela competitividade de mercado, reduzindo todo e qualquer custo - quer seja pelas políticas de bandeiras de conveniência, que possibilitam que um navio arbore uma bandeira diferente do seu país de registo, oferecendo ao armador inúmeras vantagens fiscais, bem como na redução de custos com regulamentações, taxas de registo e também possibilitando a contratação de mão de obra barata, levando a que ocorram

problemas sociais, tais como a precariedade no trabalho com péssimas condições laborais e salários extremamente baixos. (Profillidis & Botzoris, 2019a)

Os grandes promotores do rápido desenvolvimento da indústria dos transportes marítimos que se têm observado nos últimos tempos têm sido a normalização das transações digitais e da intuitiva conectividade entre produtor e consumidor, a implementação de grandes infra-estruturas de armazenamento e distribuição de bens, o fornecimento e a manutenção de cadeias de distribuição, sendo que o transporte de mercadorias via marítima tem desempenhado um papel extremamente importante naquilo que é a globalidade das trocas comerciais apresentando, consistentemente, taxas de crescimento superiores aos indicadores do Produto Interno Bruto (PIB), derivado da progressiva liberalização deste setor. Entre o início da década de 90 do século passado até ao ano de 2015, o transporte de bens por via marítima teve um crescimento na ordem dos 151%, comparando com o aumento de 87% no Produto Mundial Bruto (PMB).

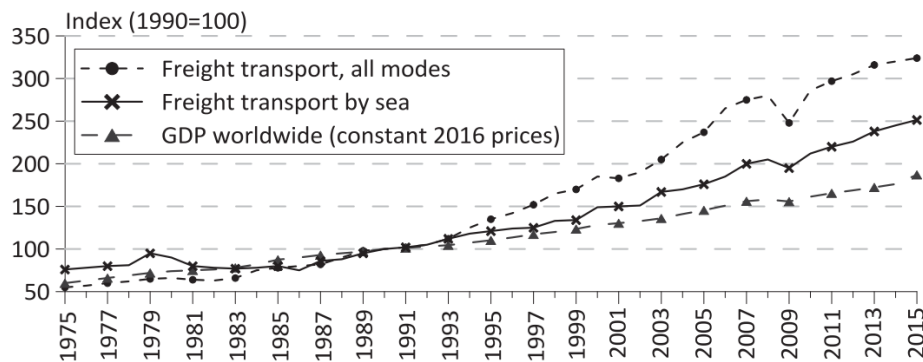


FIGURA 4: Taxa de crescimento do transporte de mercadorias via marítima(Profillidis & Botzoris, 2019a)

Com um mundo em clara transição digital e cada vez mais globalizado, as trocas comerciais entre países têm vindo a tomar um papel cada vez mais preponderante nas suas economias, dando ao setor dos transportes marítimos um crescimento sem precedentes. Este crescimento trouxe, ano após ano, mais e maiores problemas ambientais, começando também a ser olhado cada vez com mais seriedade pela comunidade científica.

Os grandes navios de transporte de mercadorias, ainda que com elevadas taxas de eficiência por capacidade de carga, apresentam indubitavelmente um impacto devastador no ambiente e na nossa saúde e onde este crescimento, não permitindo que a redução nas trocas comerciais ou o transporte de bens seja uma solução realista, carece de torná-la numa indústria mais eficiente e sustentável.

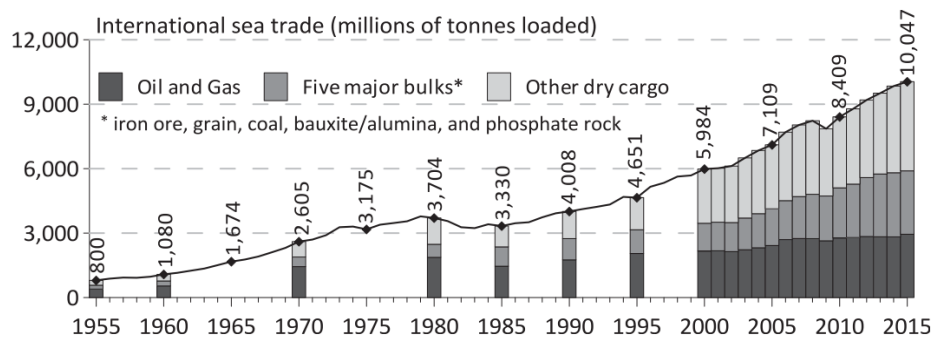


FIGURA 5: Evolução do tráfego de mercadorias via marítima (Profillidis & Botzoris, 2019a)

Delimitação do trabalho

Objetivos

Relativamente aos objetivos de investigação propostos, destacam-se os seguintes:

- Compreender o perfil de utilização dos sistemas de propulsão elétrica noutras Marinhas de Guerra;
- Compreender as Vantagens e Desvantagens de sistemas de propulsão elétrica;
- Estudar casos de sucesso noutras áreas do setor marítimo;
- Construção de um modelo de avaliação Vantagens/Desvantagens;
- Entender o motivo da não utilização, destes sistemas, na Marinha Portuguesa;
- Construção de um modelo de otimização da utilização dos sistemas elétricos existentes.

Apesar da Marinha Portuguesa ter cada vez mais na sua esquadra classes de navios que contêm sistemas alternativos de propulsão elétrica, como abordado seguidamente em (1.5.1), a utilização destes sistemas é muitas vezes posta de lado, não sendo por isso possível maximizar a sua utilização.

Os objetivos da elaboração da recolha de dados e análise estatística passam por entender qual a perspetiva do utilizador mais informado em relação às vantagens e desvantagens dos sistemas de propulsão elétrica e o porquê de, em diversas situações dos navios da Marinha Portuguesa, se optar pela sua não utilização, entender também quais as dificuldades enfrentadas na sua utilização e apresentar melhorias ao atual modelo de operação.

Para o cumprimento dos objetivos propostos acima para este trabalho, é fundamental compreender uma série de temáticas que darão ao leitor o enquadramento necessário para compreender as conclusões tomadas:

Emissões de Poluentes nos Transportes Marítimos

Referenciando o aspeto central da questão situacional das Emissões de Poluentes no Transportes Marítimos, será efetuada uma revisão do estado atual das Alterações Climáticas, inferindo tendências e perspectivando o futuro das emissões globais de poluentes para a atmosfera, olhando para as posições políticas que têm sido tomadas e para os indicadores utilizados nas medições da evolução Climática.

Propulsão Elétrica

Neste trabalho, serão exploradas diversas abordagens a novos sistemas de armazenamento de energia a bordo de navios, bem como sistemas de propulsão alternativos. Serão efetuadas diferentes análises comparativas com o objetivo de inferir as abordagens mais adequadas aos novos desafios de um mundo em clara transição tecnológica, estratégica e climática. Serão apresentados projetos de sucesso implementados, e em desenvolvimento, em navios com distintos perfis operacionais, estudadas as suas conclusões e efetuada uma análise de tendências no crescimento deste setor. Relativamente a navios combatentes, serão abordados os desenvolvimentos relativos à tecnologia da propulsão elétrica e de armazenamento de energia a bordo existentes nos navios da Marinha Portuguesa, com o objetivo de entender as principais valências destes sistemas e o seu grau utilização.

Análise Estatística

Neste capítulo será implementado um estudo de viabilidade, com recurso a questionários de opinião efetuados a bordo de navios da Marinha Portuguesa, com o objetivo de entender quais as potencialidades dos sistemas de propulsão elétrica existentes em navios com diferentes perfis operacionais que, através da sua experiência, darão a conhecer as suas limitações operacionais, atendendo aos diversos tipos de missão, dificuldades na implementação da tecnologia, quais as limitações do sistema, quais as suas vantagens, entre outros - explorando técnicas que permitam retirar o máximo das suas capacidades, bem como formas de mitigar os obstáculos à sua utilização efetiva.

Análise SWOT

Por forma a reforçar a robustez do estudo de viabilidade para a utilização de sistemas de propulsão elétrica, será efetuada uma abordagem estratégica segundo uma análise SWOT.

| | Ambiente Interno (micro) | Ambiente Externo (macro) |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Fatores Favoráveis | Forças | Oportunidades |
| Fatores Desfavoráveis | Fraquezas | Ameaças |

TABELA 2: Matriz de análise SWOT, adaptado de (Antunes, 2014; Valentin, 2001)

Capítulo 1

Propulsão Elétrica

1.1 Redução da emissão de poluentes

Apesar do comércio marítimo representar cerca de 90% do total das trocas comerciais efetuadas em todo o mundo, a verdade é que este setor desempenha apenas uma décima parte do total do Dióxido de Carbono (CO₂) emitido, anualmente, para a atmosfera e, se facto é que se verifica um aumento constante e sustentado nas trocas efetuadas via marítima na ordem dos 2%/ano, tem-se observado, paralelamente, que a percentagem de emissões emitidas para a atmosfera imputadas a este setor tem vindo a diminuir à taxa de 1%/ano.

Adicionalmente, os navios efetuam trânsitos a uma velocidade substancialmente menor, atualmente, quando comparando com início da última década,, uma vez que estudos concluíram que uma redução na velocidade média de 20 nós para 16 nós permite, não só, uma redução substancial no consumo de combustível, como também permite uma redução de até 40% no total das emissões de gases poluentes.

A acrescentar ao disposto acima, existe ainda o forte interesse por parte das companhias em reduzir as suas emissões de CO₂, uma vez que o consumo de combustível representa a maior fatia dos custos operacionais de um navio.

1.2 Legislação

Organização Marítima Internacional

A indústria dos transportes marítimos tem vindo a sofrer cada vez mais pressões ao nível da mitigação das suas emissões CFC desempenhando aqui, a International Maritime Organization (IMO), um papel fundamental na responsabilidade pela segurança da navegação, reconhecendo internacionalmente que tanto o transporte marítimo como as atividades portuárias têm enormes impactos para o ambiente.

Tendo sido publicada, em Abril de 2018, por parte da IMO, uma resolução de uma emenda à sua publicação estratégica, que visava estabelecer objetivos a curto, médio e longo prazo, como a redução da emissão de CFC's de, pelo menos,

50% até 2050 comparativamente a 2008, e que viria a dar o mote para o estabelecimento de medidas mandatórias, tal como a emenda, de 1 de Janeiro de 2020, ao Anexo VI da Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição dos Navios no Mar (MARPOL) - que se afirma como tendo como objetivo principal contribuir para a proteção do meio marinho da poluição por parte dos navios, prevenindo-o, controlando-o e melhorando também a qualidade do ar, preservando o ambiente e protegendo a sua saúde- que veio estabelecer a proibição da utilização e transporte de combustíveis com taxas de Enxofre superiores a 0,5%, e superiores a 0,1% nas Emission Control Areas (ECA)

Metas de Descarbonização

Em 2018, a IMO anuncia que fora adotada uma estratégia, por parte do Comité de Proteção do Ambiente Marítimo (MEPC) , para o estabelecimento de metas secundárias para a progressiva descarbonização do setor marítimo, tais como:

1. Uma redução de, pelo menos, 40% das emissões até 2030;
2. Uma redução de metade das emissões até 2050;
3. Atingir a neutralidade carbónica até ao ano de 2100;

Estas medidas foram estabelecidas tendo em comparação o total de emissões absolutas emitidas no ano de 2008, visando alinhar as políticas do setor dos transportes marítimos com o Acordo de Paris para o Clima, mantendo o aquecimento global bem abaixo dos 2º Celsius, de acordo com o capítulo ().

MARPOL

Com o objetivo de estabelecer, regulamentar e uniformizar procedimentos de segurança para a navegação no mar surge, por parte das Nações Unidas, em 1948, na Conferência de Genebra, a formalização de uma convenção que viria a estabelecer a criação da IMO. Esta organização mostrava-se, desde logo, focada em:

«Providenciar mecanismos de cooperação entre nações para a área das práticas e da regulamentação governamental, relativa aos diferentes aspetos técnicos que afetam as trocas comerciais por via marítima, encorajando e facilitando a adoção generalizada dos mais elevados padrões de segurança, eficiência da navegação e prevenção da poluição marítima»

(IMO, 2006)

Cerca de três décadas mais tarde - após o funesto inverno do ano de 1976, com a ocorrência de 10 desastres com Petroleiros num espaço de 3 meses - viria a ser compreendida a necessidade de proporcionar a criação de um mecanismo regulatório, por forma a prevenir o acontecimento destes desastres ambientais.

Era, então, adotada a MARPOL, com o principal objetivo de:

«Providenciar regulamentações que permitam preservar os oceanos através da completa eliminação da sua poluição por Hidrocarbonetos e de outras substâncias nocivas, como os seus derrames acidentais»
(IMO, 2006)

Energy Efficiency Design Index (EEDI)

A IMO assumiu, desde cedo, o seu papel de liderança na luta pelo desenvolvimento sustentável no seu setor 1.2, com o objetivo de reduzir a pegada ambiental, não só nos navios construídos a partir de então, como também melhorar os índices de eficiência de mais de 50 mil navios, já em operação.

A este indicador foi dado o nome de Energy Efficiency Design Index (EEDI), ditando que a partir do ano de 2023 todos os navios deverão cumprir com padrões de performance específicos, sendo mandatória a implementação de mecanismos que aumentem o valor do seu índice até 50% - dependendo do tipo de navio. Para além disso, os navios têm de assegurar que efetuam melhorias efetivas na sua pegada de carbono, num relatório anual designado para o efeito - o Carbon Intensity Indicator (CII) - com consequências duras em caso de incumprimento, como planos de ação corretiva, entre outros. O EEDI dita, ainda, que todas unidades construídas a partir de 2025 serão, pelo menos, 30% mais eficientes comparativamente com a frota atual.

1.2.1 Acidificação dos oceanos

As alterações climáticas provocadas, entre outros, pelo aumento da presença de gases poluentes na atmosfera terrestre, pela poluição por excesso de nutrientes nos solos, têm vindo a alterar a geo-química do planeta terra a ritmos que excedem os seus próprios recordes, ano após ano. Muitas destas alterações ligadas, direta e indiretamente, à ação humana na queima de combustíveis fósseis, no uso de fertilizantes para a agricultura intensiva e da produção industrial, têm levado a uma elevada acidificação dos solos e, naturalmente, dos oceanos. O aumento dos níveis de concentração de CO₂ no planeta tem enormes impactos em todo o ecossistema e, em especial, nos oceanos que este é o maior sumidouro de carbono do planeta. Estudos afirmam que os oceanos desempenham um papel bastante mais importante na retenção do carbono emitido segundo fontes antropogénicas do que se pensara até então, absorvendo até cerca 30% destas emissões e retendo, ainda, cerca de 50 vezes mais carbono do que toda a atmosfera, recorrendo a mecanismos físicos e biológicos (Khaliwala, Primeau & Hall, 2009). Quando estes sistemas de aprisionamento de carbono veem a sua estabilidade afetada pelas alterações do meio, perdem a capacidade de manter o equilíbrio entre o reinjetam o carbono de novo na atmosfera. (Ocean & Climate Platform, 2021)

Por outro lado, a queima de combustíveis pouco refinados como é o caso do Heavy Fuel Oil (HFO), muito utilizado no setor marítimo, é uma das principais fontes de acidificação da Hidrosfera. Com a libertação de um gás com uma elevada solubilidade na água como o Dióxido de Enxofre (SO₂), ele reage com as moléculas de H₂O resultando num dos ácidos com maior responsabilidade na redução do

pH, tanto nas águas como nos solos. Esta acidificação tem um impacto ambiental tremendo, ferindo a vida aquática, causando a morte de espécies, mas também diretamente na vida humana, causando não só doenças cardiovasculares como também diversas irritações de pele, tosse e náuseas, bem como danos em estruturas e monumentos.

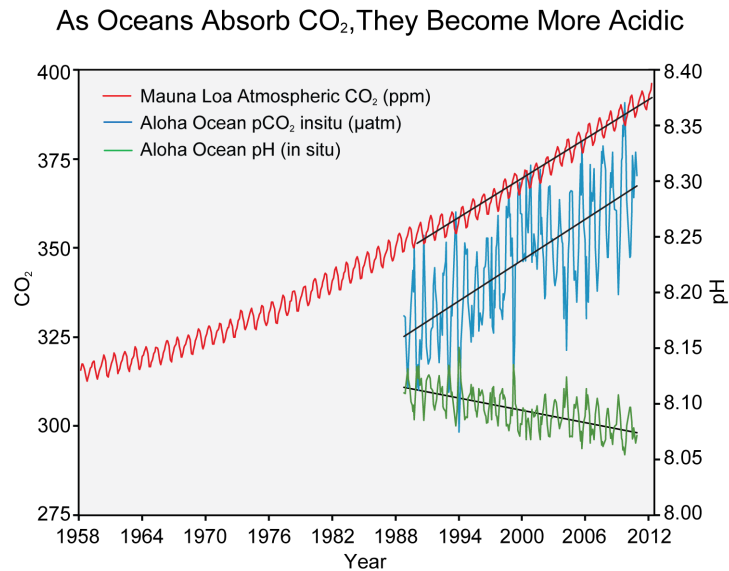


FIGURA 6: Evolução da Acidificação dos Oceanos na Estação de Aloha, Arquipélago do Hawai (Feely, Doney & Cooley, 2009)

Face ao disposto, os navios modernos têm surgido, cada vez mais, munidos de tecnologias que resultam numa forte mitigação de emissões de elementos nocivos para o meio ambiente que, dependendo de diversos fatores como o tipo de navio, o seu perfil operacional ou até as suas áreas de operações, apresentam inúmeras vantagens à sua implementação, sempre com vista ao aumento da sua eficiência energética. De seguida apresenta-se um conjunto de sistemas e técnicas que o pretendem fazer:

1. Combustíveis com baixo teor de enxofre (LSFO)
2. Scrubber Húmido;
3. Scrubber Seco;
4. Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR);
5. Selective Catalytic Reduction (SCR);
6. Exhaust Gas Recirculation (EGR);

1.2.2 Combustíveis com baixo teor de enxofre

De acordo com as limitações impostas a combustíveis com um alto teor de enxofre por parte da MARPOL, abordadas no capítulo anterior, e apesar da refinação de combustíveis baixos em teor de enxofre (LSFO) apresentar um custo

substancialmente superior - estimando um aumento de 60 mil milhões de dólares em custos associados à implementação deste tipo de combustível na frota de navios por parte das empresas. 50% mais dispendioso, em relação ao combustível tradicional - tendo esta implementação ficado, numa primeira fase, posta de parte em detrimento da instalação de tecnologias que permitam efetuar um tratamento dos gases libertados, como os sistemas Scrubber (Tirschwell, 2017), a verdade é que a utilização de LSFO assume um papel fundamental neste tipo de navios, quando se trata de efetuar navegações nas ECA. A utilização de LSFO é uma das formas mais fáceis, e baratas numa primeira fase, de evitar as emissões de Óxidos de Enxofre (SO_x) e cumprir com os regulamentos internacionais, como a navegação nas áreas de emissão restrita, uma vez que não necessita de alterações estruturais à plataforma. (Sentís, 2012)

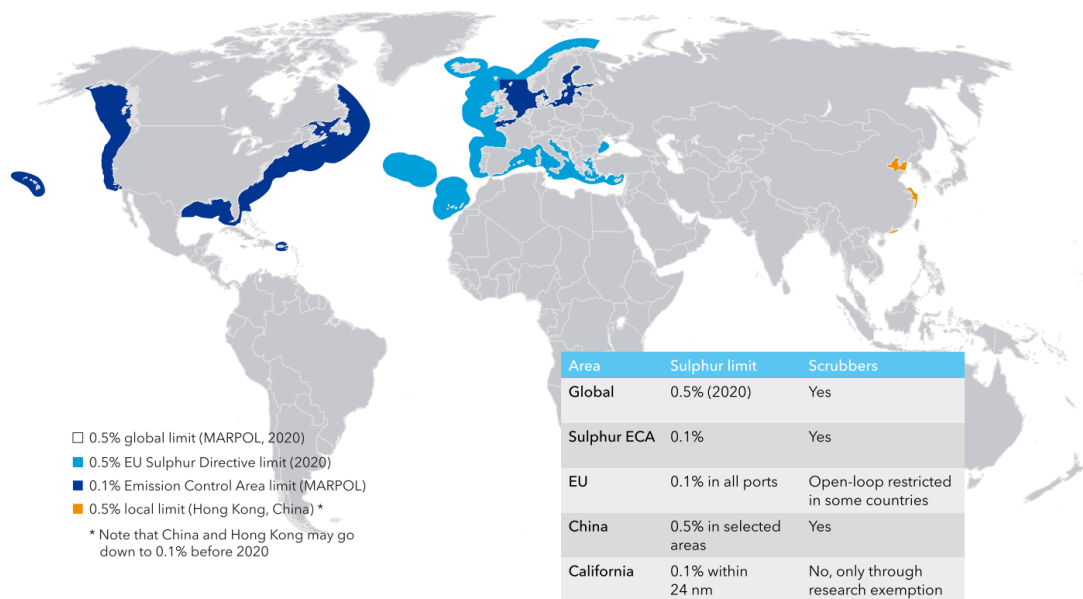


FIGURA 7: Emission Control Areas (2020) (DNV-GL, 2016)

1.2.3 Sistemas scrubber húmidos

Este tipo de tecnologia tem como principal finalidade o tratamento dos gases de escape, sendo instalado diretamente nos sistemas de evacuação de gases do navio. Apresenta-se como uma solução a curto prazo, uma vez que possibilita a diminuição imediata das emissões de SO_x para a atmosfera, por parte do navio, sem limitar a sua capacidade operacional.

Relativamente à implementação de sistemas Scrubber, existem diversas considerações a ter em conta quando se estuda o modelo mais indicado para determinado tipo de navio. Se os aspetos relacionados com o seu peso e o volume que ocupa são determinantes, e podem ser limitativos, quando se trata de uma instalação posterior num qualquer navio - características como a configuração do navio, o seu perfil operacional, o tipo de missões a que é sujeito ou até mesmo o tempo de permanência

em áreas, ou portos, que restrinjam grandemente o tipo e quantidade de descargas efetuadas pelo próprio navio são fatores a ter em conta quando buscamos a otimização destes sistemas, permitindo maximizar a eficácia na redução das emissões de poluentes neste setor. (DNV-GL, 2016; Tirschwell, 2017)

Os sistemas Scrubber, têm três tipos de tecnologia: de tipo circuito aberto, onde a água do mar, alcalina por natureza, é utilizada no processo de limpeza dos SO_x do sistema. Nos sistemas de circuito aberto existe a desvantagem de este tipo de utilização resultar numa acidificação da água do mar, mesmo apesar de as águas resultantes utilizadas no processo terem de garantir os requisitos mínimos impostos, pela MARPOL, para serem descartadas. Este tipo de sistemas revelam-se bastante restritivos, uma vez que o navio fica impedido de navegar em locais/portos onde o descarte deste tipo de resíduos se encontra proibido por lei. No caso dos navios navegarem em águas com um nível de acidez ligeiramente mais elevado este sistema já não é eficaz. Sistemas de circuito fechado permitem uma re-circulação das águas, utilizando uma mistura de químicos, entre eles o Hidróxido de Sódio (NaOH), por forma a aumentar o teor de alcalinidade após ser utilizada no processo e permitindo não existir um descarte de produtos nocivos. Sistemas de circuito fechado são, maioritariamente, instalados em navios que operam em águas interiores e doces, com um teor mais reduzido de alcalinidade.

É nesta fase que entram os sistemas híbridos, que têm a capacidade de ser utilizados como sistemas de escape de circuito aberto ou de circuito fechado, consoante a situação que encontram e é este o tipo de sistema mais habitual devido ao facto de proporcionarem superior versatilidade de operar em áreas e portos mais ou menos restritivos.

Apesar de ser um sistema algo dispendioso de implementar, especialmente se estivermos a falar de modernizações de sistemas já existentes, tem um custo associado que é conhecido, ao contrário do preço dos LSFO, onde ainda é difícil prever qual a evolução dos seus preços e, portanto, não se encontrando esclarecida esta situação, apresentando também uma compatibilidade quase total no que toca às instalações propulsoras.

Todos os sistemas Scrubber existentes têm a capacidade de cumprir ambos os critérios de 0,5% e de 0,1% de massa específica de SO_x emitidos para a atmosfera, visado na emenda ao Anexo VI da IMO, a 1 de Janeiro de 2020, alterando para isso apenas a quantidade de água e químicos utilizados no processo de limpeza.

1.2.4 Scrubber seco de membrana cerâmica

Este sistema terá sido recentemente introduzido no mercado, sendo o resultado de uma inovação ao tradicional sistema Scrubber húmido. Este novo desenvolvimento tem a particularidade de utilizar uma membrana de cerâmica micro-porosa com um composto químico de absorção de $Ca(OH)_2$. Este composto reage com o SO_2 , gerando uma reação química que obtém como produto da reação Vapor de Água (H_2O) e CO_2 , um gás menos perigoso para o meio ambiente comparativamente com os compostos sulfurosos, eliminando também a emissão de Material Particulado

(PM) o escape de águas de descarga. Este sistema seco, comparativamente ao seu antecessor, é 50% menos volumoso e 30% mais eficiente.

Este sistema Scrubber tem, ainda, a capacidade de conseguir compensar os custos de aquisição dos compostos químicos necessários para a operação do sistema com o retorno dado pela sintetização dos produtos resultantes das reações químicas. (Carter & Panziera, 2015)

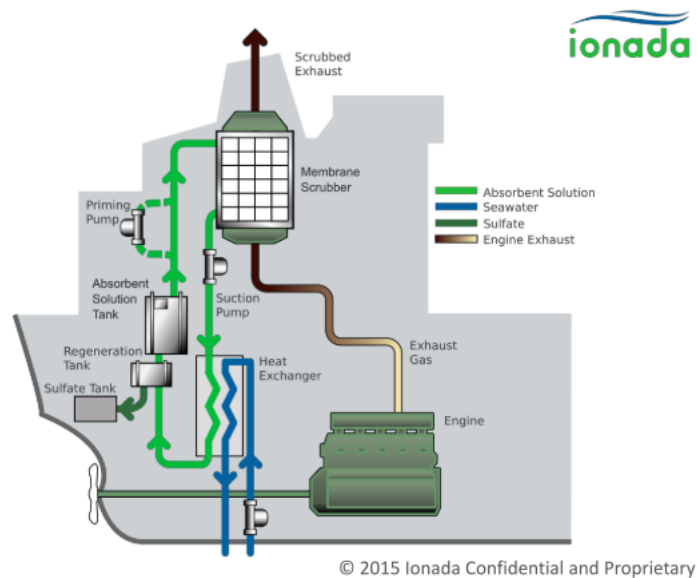


FIGURA 8: Scrubber de Membrana Cerâmica, desenvolvido pela IO-NADA (Carter & Panziera, 2015)

1.2.5 Redução seletiva não-catalítica

Nestes sistemas de redução da emissão de Óxidos de Nitrogénio (NO_x) é utilizado o Amónia (NH_3) e a Ureia ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$), compostos químicos à base de Nitrogénio e Hidrogénio para que, reagindo quimicamente com estes se possam obter produtos da reação como o Oxigénio (O_2) e o Vapor de Água, ocorrendo sob temperaturas entre os 870°C e os 1200°C . (Leite, 2020)

1.2.6 Redução seletiva catalítica

Atualmente, é o sistema que apresenta os melhores desempenhos, permitindo taxas de redução de emissões de NO_x na ordem dos 95% (Yang et al., 2012). O princípio de funcionamento deste sistema de redução de emissões é, na sua grande maioria, semelhante ao do SNCR, utilizando igualmente compostos químicos de Amónia e obtendo os mesmos produtos da reação química. Este sistema atua no momento final da combustão, e com a sua particularidade de, tal como o nome indica, ter um catalisador a acelerar a velocidade da reação química, oferecendo condições para ocorrer a temperaturas bastante mais reduzidas - entre os 340°C e os 380°C - captando os gases de escape para o catalisador e removendo as partículas

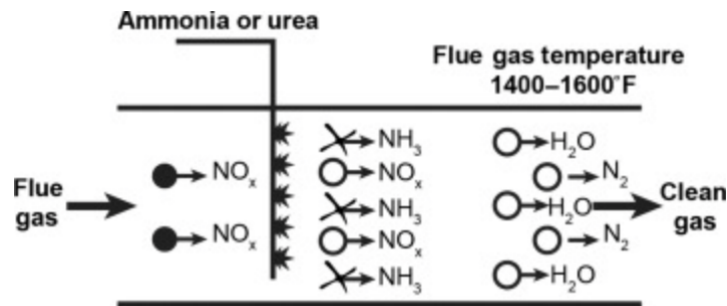


FIGURA 9: Esquemática de funcionamento de um equipamento de redução seletiva não-catalítica

nocivas que seriam libertadas para a atmosfera, libertando como produto O_2 e H_2O . (Leite, 2020)

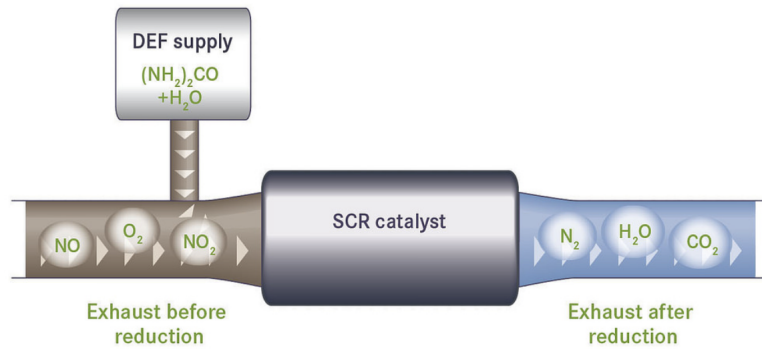


FIGURA 10: Esquemática de funcionamento de um equipamento de redução seletiva catalítica

1.2.7 Recirculação dos gases de escape

A técnica de re-circulação do gás consiste em introduzir novamente no turbocompressor uma parte dos gases de escape resultantes da própria combustão. Ao reduzir a presença de Oxigênio na reação, aumenta a capacidade calorífica, diminuem as temperaturas máximas que são atingidas durante a combustão e, como resultado, diminuem as emissões de NO_x .

Este sistema tem a particularidade de poder ser acoplado a um sistema Scrubber, aumento a sua performance, podendo vir a ser uma das melhores soluções para a acidificação causada por este setor. Esta é uma tecnologia que está, neste momento, a iniciar a sua implementação no setor marítimo mas os primeiros resultados indicam desempenhos bastante promissores, com estudos afirmando conseguir níveis de absorção combinados de até 80%. (Sentís, 2012)

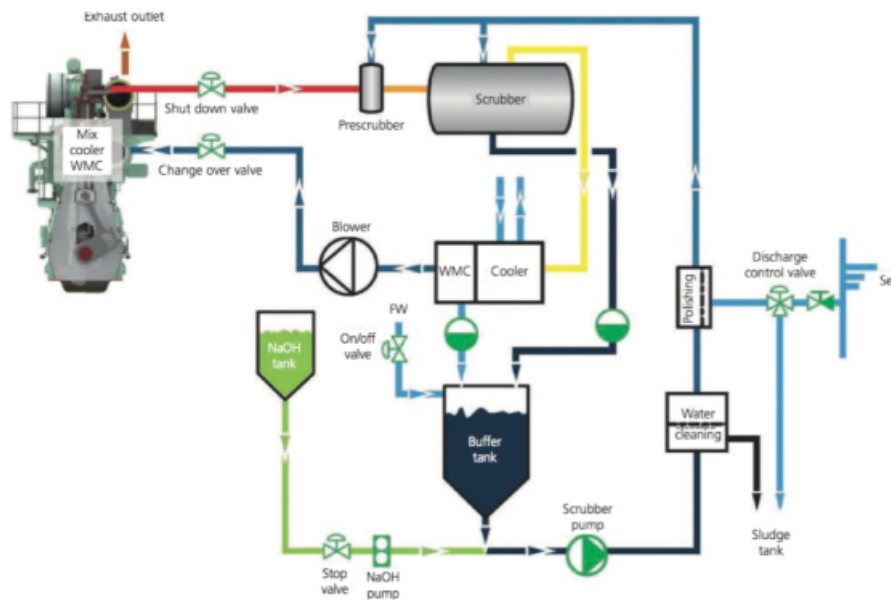


FIGURA 11: Sistema Scrubber com um EGR acoplado

TABELA 3: Comparação de eficácia das diferentes técnicas de redução de poluentes, comparando com a utilização de HFO (Carter & Panziera, 2015; Sentís, 2012)

| Redução (%) | NO _x | SO _x | Partículas | Eficiência |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------|------------|
| Scrubber húmido | 85% | 95% | 80% | -5% |
| Scrubber seco | | 100% | 100% | 30% |
| SNCR | 40% | | | |
| SCR | 80% | | | |
| LSFO | | 95% | | |
| EGR | 60% | | | |

TABELA 4: Tabela Comparativa dos diferentes sistemas de Tratamento de Gases e Produtos de Evacuação (Sentís, 2012)

| | Húmido | | | Seco |
|------------------------------------|--|-----------------|---------|---------------------|
| | Aberto | Fechado | Híbrido | |
| Opera sem efetuar descargas | - | Sim | | Sim |
| Peso do sistema | | 30-55 toneladas | | 200 toneladas |
| Consumo Energético | 2% | 1% | 2% | 0,2% |
| Utiliza compostos Químicos | - | NAOH | NAOH | Ca(OH) ₂ |
| Compatível com SCR | Apenas se um sistema de re-aquecimento for instalado a jusante para elevar a temperatura de escape | | | Sim |
| Compatível com WHRS | Apenas se o Scrubber estiver instalado a jusante | | | Sim |

1.2.8 Célula de Combustível

Atualmente, as células de combustível, também designadas por *Fuel cell*, representam um dos sistemas mais eficazes na redução das emissões poluentes. Este sistema tem vindo a ser implementado com sucesso em navios combatentes que, devido às suas mais variadas valências, se adequa a perfis operacionais bastante específicos, como é o caso dos Submarinos da Classe Tridente, da Marinha Portuguesa. Para além de não ocorrerem emissões de gases poluentes, o sistema de célula de combustível permite uma redução de vibrações e de ruído, característica bastante requisitada em navios com características operacionais que exijam um elevado grau de furtividade como um submarino, oferecendo-lhe uma enorme valência em missões de vigilância e recolha de informações, respondendo eficazmente aos compromissos de Portugal com os países aliados, na Organização do Tratado do Atlântico Norte (NATO) . As células de combustível tiram partido da elevada capacidade energética do Hidrogénio, que é usado como combustível, sendo convertida em energia térmica,

segundo processos eletroquímicos, por reação com o Oxigênio presente nas moléculas da Água - matéria abundante e facilmente disponível. Este processo tem como únicos produtos da reação o H_2O e o O_2 , e proporciona ao navio uma independência de ar atmosférico conhecida por *Air Independent Propulsion* (AIP), tecnologia que permite aos submarinos, combinando as valências da utilização de sistemas de armazenamento de energia juntamente com as células de combustível, uma elevada autonomia em imersão.

Devido às diversas vantagens na sua adoção, seria esperado que a tecnologia de célula de combustível tivesse conseguido obter o seu protagonismo no mercado dos transportes, como se previa (Trencher & Edianto, 2021). No entanto, alguns obstáculos à sua adoção têm feito com que esta tecnologia ainda não tenha uma quota de mercado muito acentuada. Alguns destes obstáculos passam pelos elevados custos de adoção do sistema, pela escassez da sua oferta ou pela ainda deficitária infraestrutura de apoio, numa altura em que o mercado dos veículos 100% elétricos (BEV) com recurso a baterias de iões lítio cresce a uma taxa de 22%/ano (Facts & Factors, 2020), que com a sua capacidade de eliminar por completo qualquer tipo de emissão poluente de forma direta, tem canibalizado o desenvolvimento de outros sistemas alternativos dentro deste setor.

Na vertente militar dos navios combatentes, onde o perfil operacional e a vantagem tática prevalecem como os principais fatores na construção da plataforma sobre os custos operacionais, de países com menores orçamentos para a defesa, esta hipótese tem ganho a sua importância, uma vez que são aproveitadas as mais-valias destes sistemas de produção e armazenamento de energia, com um custo de aquisição muito inferior ao de navios com propulsão nuclear, mas também com diversas vantagens em relação aos sistemas geradores diesel, nomeadamente:

1. 50-60% de eficiência energética (25% a 35% dos geradores diesel);
2. Sem aumento nos custos totais de aquisição, manutenção e operação;
3. Redução da assinatura acústica, devido à inexistência de partes móveis;
4. Redução da assinatura térmica, devido a inexistência de combustão;
5. Aumento da vida útil do navio; (Adams, 1990)

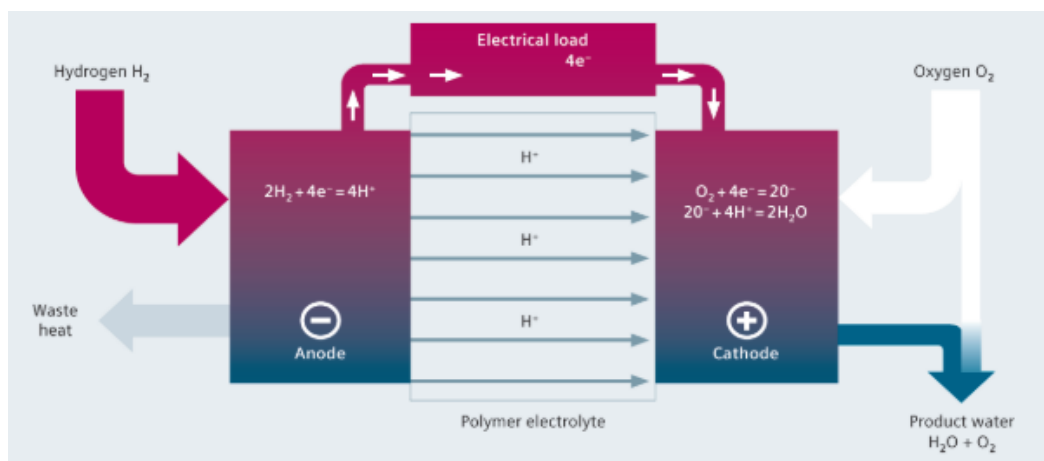


FIGURA 12: Princípio de funcionamento de uma célula de combustível (Leite, 2020)

As células de combustível permitem melhorar a eficiência de combustível dos futuros sistemas de energia navais. Como estas células produzem a sua energia elétrica, a integração num sistema de produção de energia elétrica é mais facilitado, sendo apenas um outro tipo de grupo gerador. Embora os desafios técnicos de integração de células de combustível tenham vindo a limitar a sua implementação em navios de superfície, esses desafios têm vindo a ser mitigados pela indústria. Num futuro próximo, quando as células de combustível ganharem a sua viabilidade, o navio de guerra elétrico facilitará a sua integração em diferentes tipos de projeto. (Doerry, Amy & Krolick, 2015)

1.3 Promoção da inovação e estímulo ao desenvolvimento

Os sistemas de propulsão elétricos apresentam características diferenciadoras e a sua viabilidade, em determinados tipos de operação, veio desconstruir um pouco aquilo que é a construção naval tradicional, possibilitando a adoção de sistemas que, pelas suas características e valências, trazem outro tipo de soluções e formas diferentes de operar. O aumento da eficiência destes sistemas, bem como a implementação progressiva de equipamentos mais amigos do ambiente permite, não só, responder ao aumento das pressões por parte das diversas entidades competentes bem como permite diversas novas abordagens que podem trazer enormes vantagens para a missão do navio. (Koumentakos, 2019)

Um bom exemplo disso é a possibilidade que os motores elétricos oferecem de, devido às suas reduzidas dimensões, à sua elevada disponibilidade energética, ao seu elevado binário e à sua flexibilidade de projeto, tornar cada vez mais viável a implementação de Azipods em navios de guerra com tipos de missão específicos.

A utilização destes propulsores azimutais é amplamente utilizada em grandes navios de cruzeiro onde o conforto é privilegiado, oferecendo uma maior eficiência

de propulsão e libertando espaços internos do navio, deslocando os motores dedicados à propulsão para estruturas estanques fora de bordo, no hélice - eliminando a existência de uma linha de veios e aumentando substancialmente a manobrabilidade do navio com a capacidade do leme de girar 360 graus.

Esta questão ganha uma relevância acrescida, apoiada por desenvolvimentos favoráveis na área da densidade energética destes motores, que vão abrindo caminho à sua viabilidade operacional em novos e diversos tipos de missão, que outrora não existiam.

Perspectivando o futuro, é fundamental entender que existem oportunidades para uma maior implementação de propulsão elétrica em navios combatentes, tanto de superfície como sub-superfície, o desafio é, no entanto, o de providenciar a densidade de potência adequada às necessidades dos navios de guerra modernos. Navios como os Destroyer da classe Daring, com uma elevada necessidade energética devido ao seu denso sistema de armas, sensores e demais equipamentos elétricos, vieram comprovar que a propulsão elétrica tem o seu espaço na indústria militar, oferecendo diferentes abordagens, perfis operacionais mais versáteis, obtendo vantagem tática em diversas situações, reduzindo ainda os custos operacionais da unidade. (Koumentakos, 2019; Wu & Bucknall, 2016)

1.3.1 Sistemas de armazenamento de energia com recurso a baterias

A disseminação dos motores de combustão interna no início do séc.XX veio diminuir drasticamente a popularidade da propulsão elétrica aplicada a navios. Esta popularidade só viria a retomar algum ímpeto com a crise energética que assolou o mundo ocidental nos anos 70 desse século, com o embargo levado a cabo pelos países Árabes às exportações de Petróleo e seus derivados, inflacionando os seus preços. Juntamente com o aparecimento da tecnologia associada à captação de energia solar com recurso a células solares, surgiu a oportunidade de implementar pequenos barcos movidos baterias. Com o aumento do interesse e do desenvolvimento da tecnologia de armazenamento de energia, o crescimento da propulsão elétrica naval não seguiu no mesmo caminho, até há pouco anos atrás. Seguindo a viabilidade e desenvolvimento dos veículos 100% elétricos e o sucesso de projetos tais como os referidos em (1.4), é inevitável que o futuro dos navios contenha em si diferentes formas de propulsão e de armazenamento de energia elétrica. (Bjorn-Johan, Sverre & Oystein, 2017)

1.3.2 Baterias de iões-lítio

A operacionalidade energética de todos os sistemas e equipamentos a bordo dos navios é assegurada pelo seu sistema gerador de energia, que consome grandes quantidades de combustível, aumentando os custos operacionais do navio, custos com a manutenção dos geradores, contribuído também para o aumento das emissões de gases poluentes para a atmosfera.

A propulsão híbrida terá sido introduzida em navios com um determinado perfil operacional caracterizado por longos períodos de navegação a velocidades constantes, com uma baixa necessidade energética (geralmente abaixo dos 40% da sua velocidade máxima), aproveitando os melhores índices de eficiência energética de um motor elétrico.

Mais recentemente, o desenvolvimento das baterias de alta densidade no setor automóvel, tem criado um pretexto para a sua utilização, cada vez mais acentuada, em navios combatentes e de patrulha, bem como em rebocadores ou navios de plataforma, devido às suas diversas vantagens operacionais. Apesar do elevado custo de aquisição, um sistema integrado de armazenamento de energia com recurso a baterias pode fornecer um nivelamento da carga disponível - reduzindo as cargas nos picos de potência e aumentando a disponibilidade energética fora dos picos - proporcionando a disponibilidade imediata de uma reserva de energia bastante eficaz, e um modo de propulsão livre de ruído e emissões.

A utilização de baterias como fonte exclusiva de energia para a propulsão está ainda reservada a navios que não necessitem de efetuar grandes troços, como Ferries e Ro-Ro.



FIGURA 13: Pack de bateria Rolls-Royce a bordo de um navio Sea-Cosco (DNV-GL, 2021)

1.4 Sistemas de propulsão elétrica na Marinha Mercante

Projetos implementados

Neste capítulo, serão dados a conhecer um conjunto de projetos de sucesso na implementação de sistemas híbridos, mas também de sistemas que utilizam exclusivamente baterias como fonte de energia para a sua propulsão.

Será, também, efetuada uma análise das conclusões retiradas de cada um dos projetos, referindo os progressos efetuados nesta área, bem como os principais obstáculos enfrentados durante todo o processo de implementação.

FellowSHIP

O projeto fellowSHIP, desenvolvido por um consórcio de empresas viradas para o desenvolvimento de sistemas pioneiros na sustentabilidade do setor dos transportes marítimos, foi o primeiro projeto deste tipo a apresentar diversas conclusões de enorme sucesso no desenvolvimento da utilização de sistemas com recurso a célula de combustível, sistemas híbridos e, por fim, de armazenamento de energia em baterias de iões lítio, para o setor marítimo.

Este projeto decorreu por diversas fases, num período de 14 anos compreendidos entre 2003 e 2018, onde foram testadas diversas tecnologias de armazenamento e produção de energia a bordo.

O navio Viking Lady foi o primeiro navio mercante alimentado exclusivamente por um sistema de baterias. Baterias alimentadas por uma célula cujo principal combustível é o Hidrogénio, mas que foi desenvolvido para operar também com metanol, com Gás Natural Liquefeito (LNG) ou até com biocombustível, conseguindo reduzir o consumo de combustível e o ruído, e aumentando a performance e a segurança.

Este projeto permitiu concluir uma redução completa de SO_x , uma redução de até 85% de emissões de NO_x , de CO_2 de até 20%, mas também de uma redução de 15% no consumo de combustível. (Bjorn-Johan, Sverre & Oystein, 2017)



FIGURA 14: Viking Lady, navio utilizado na colaboração para o desenvolvimento do projeto FellowSHIP (Bjorn-Johan, Sverre & Oystein, 2017)

Conclusões-chave para futura implementação:

1. Redução de emissões
2. Melhorias na utilização e flexibilidade e aproveitamento dos componentes
3. Reduções dos custos de manutenção

4. Otimização da performance dos materiais
5. Intervalos mais longos entre manutenções planeadas
6. Necessidade de manutenções menos frequentes

MF Ampere

O segmento dos Ferry é um segmento com características para beneficiar com a adoção de sistemas de propulsão elétrica e até de navios 100% elétricos. Como o caso do MF Ampere, o primeiro ferry de grandes dimensões movido exclusivamente a energia armazenada num sistema de baterias a bordo. Este navio entrou em operação em 2015 e tem a capacidade para 120 veículos e mais de 350 passageiros.

O navio está equipado com um sistema de armazenamento de energia em baterias com uma capacidade total na ordem de 1MWh. Para o carregamento destas baterias, o navio beneficia de uma infraestrutura de carregamento rápido nos portos que pratica e que permite o seu carregamento total em cerca de 10min enquanto o navio recebe a carga e uma carga lenta no período da noite.

Consequentemente, o governo Norueguês decidiu incentivar a adoção continuada de navios de transporte de mercadoria e/ou de passageiros 100% elétricos nas suas águas, com vista a atingir a meta das emissões zero. (Bjorn-Johan, Sverre & Oystein, 2017; Wu & Bucknall, 2016)



FIGURA 15: MF Ampere a navegar nos Fiordes (Wu & Bucknall, 2016)

Yara Birkeland

Um dos projetos mais ambiciosos e de sucesso na área dos navios autónomos e 100% elétricos é o navio Yara Birkeland, que resulta do esforço conjunto entre o maior desenvolvedor de sistemas de alta tecnologia no setor civil e militar naval - Kongsberg - e uma gigante da indústria química Norueguesa - a Yara International.

Com toda a tecnologia, baterias, sensores e sistemas de propulsão a serem desenvolvidos e implementados pela tecnológica Norueguesa Kongsberg, foram também integrados no projeto sistemas de monitorização que possibilitam a operação remota do navio, sendo este projeto o primeiro navio de carga autônomo 100% elétrico e com a capacidade de operar sem uma guarnição presente no navio.

Este navio, para além de não emitir qualquer poluente para a atmosfera, permite a retirada de veículos pesados de circulação no equivalente a 40 mil ligações terrestres/ano, cumprindo com todas as regulamentações de emissões, mas também possibilitando o descongestionamento das vias de comunicação terrestres deste país. (Kongsberg Maritime, 2020)



FIGURA 16: Yara Birkeland atracado no porto de Horten, Noruega
(Marine Traffic, 2021)

Este navio encontra-se em fase final de testes com previsão de início de operações capacitadas para o fim do corrente ano. Tem uma capacidade total de armazenamento de energia em baterias na ordem dos 9MWh, que lhe confere uma autonomia total de 30 milhas náuticas, e que alimentam um sistema de propulsão 100% elétrico composto por 2 Azipods e impulsores de proa e popa, permitindo ao navio capacidade total autônoma não só durante a navegação mas também nas manobras de largada e atracação.

Este navio caracteriza-se por ser capaz de efetuar cargas e descargas de uma forma completamente automatizada, mas também por não possuir qualquer tanque de lastro, beneficiando para esse efeito da posição estratégica das suas baterias.

Para garantir o sucesso logístico da operação do navio e para desconflitar quaisquer aspetos relacionados com a sua segurança, foi implementado um Centro de Apoio Operacional remoto, num dos portos Noruegueses praticados. (Kongsberg Maritime, 2020)

1.5 Sistemas de propulsão elétrica em Navios Combatentes

Contratorpedeiro Type 45

Os navios da classe Daring da Marinha Real Britânica notabilizaram-se pelo sucesso da implementação dos seus sistemas de propulsão elétrica que, após duas décadas de testes, mostraram fiabilidade e uma boa capacidade de resposta quando são necessários elevados padrões de binário, rápidas mudanças velocidade, direção e sentido de marcha, bem como uma elevada resistência ao impacto.

Este navio tem a particularidade de ter sido construído segundo técnicas modulares, o que facilita a integração de novos sistemas com tecnologia mais desenvolvida a custos mais reduzidos.

Esta classe de navios caracteriza-se também pela adoção de um Sistema Integrado de Propulsão Elétrica (IFEP) que permite ao navio uma produção simultânea de energia para a instalação propulsora, mas também para os equipamentos auxiliares e energia de bordo.

Este navio utiliza dois motores elétricos alimentados por duas turbinas a gás - ou por grupos eletrogéneos diesel, em alternativa - para garantir a sua propulsão. (Alves, 2007; Sulligoi, Vicenzutti & Menis, 2016; Vitorino, 2016)



FIGURA 17: HMS Duncan, último navio da Classe Daring a ser comissionado (Reuters, 2016)

1.5.1 Sistemas de propulsão elétrica na Marinha Portuguesa

Submarinos da classe «Tridente»

Os submarinos da Marinha Portuguesa operam o seu motor propulsor exclusivamente com energia proveniente dos módulos de baterias instalados a bordo. Existem, no entanto, dois modos diferentes de produzir energia para alimentar estas baterias. O modo utilizado em cerca de 95% do tempo para produzir esta energia é com recurso a um sistema de células de combustível (Fuel cell), modo que apresenta as maiores vantagens operacionais e que serão abordadas mais abaixo neste capítulo. No entanto, existem curtos períodos da missão onde é permitido cometer indiscrições acústicas, e visuais, em benefício de um aumento da velocidade do submarino sem utilizar a energia das baterias, onde o submarino emerge à cota periscópica para efetuar a admissão do ar necessário para a combustão dos motores diesel que produzem a energia mecânica que os geradores elétricos mais tarde converterão em energia elétrica, para alimentar as baterias.



FIGURA 18: NRP *Tridente* (Marinha Portuguesa, 2021b)

Navios Hidrográficos da classe «D.Carlos I»

Construídos nos estaleiros de Seattle, nos EUA, os navios hidrográficos da Marinha Portuguesa possuem um sistema de propulsão diesel-elétrica integrada constituído por 4 grupos geradores principais com 600kW/cada que alimentam os sistemas com 2 motores elétricos propulsores principais e duas linhas de veios ligadas diretamente a cada um deles, os conversores e os restantes equipamentos do navio,

bastando na generalidade dos casos de 3 geradores por forma a manter a velocidade máxima do navio e todos esses equipamentos. (Ramalho Marreiros & Brandão Correia, 2008)

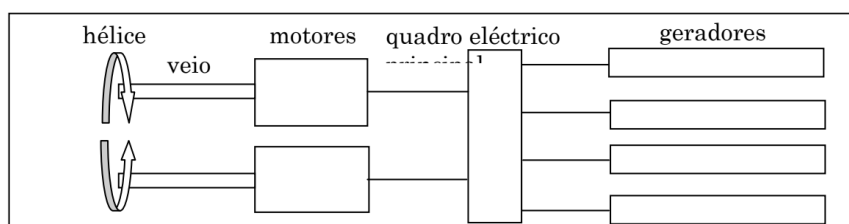


FIGURA 19: Esquema simplificado da Instalação Propulsora e de Produção de Energia do NRP *D. Carlos I* (Ramalho Marreiros & Brandão Correia, 2008)



FIGURA 20: NRP *D. Carlos I* (Marinha Portuguesa, 2021a)

Navios de Patrulha Oceânica da classe «Viana do Castelo»

Construída nos estaleiros navais da West Sea em Viana do Castelo, cidade que dá nome a esta classe de navios de Patrulha Oceânica possui um sistema de propulsão diesel-elétrica composta por 2 motores diesel com 3900kW/cada e por 2 motores elétricos com 300kW/cada, numa combinação que pode ser utilizada apenas utilizando os motores diesel ou utilizando ambos os motores a uma gama de velocidade até aos 20 nós, ou ainda com a possibilidade de operar exclusivamente com motores elétricos até à velocidade dos 10 nós (sistema designado CODELOD - Combined Diesel Electric Or Diesel). Esta combinação permite, na totalidade das

suas capacidades, operar numa faixa de velocidades que vai desde os 2 nós até aos 20 nós.

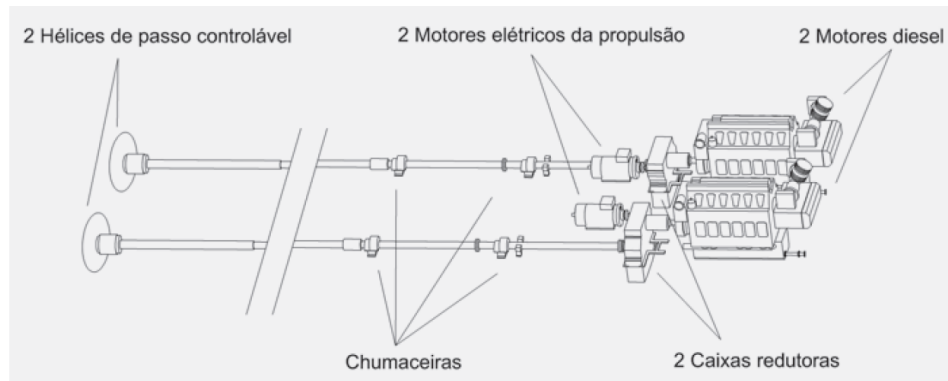


FIGURA 21: Instalação Propulsora dos navios da classe «Viana do Castelo» (Marinha Portuguesa & Equipa de Acompanhamento e Fiscalização dos Navios de Patrulha, 2020)

O problema do dimensionamento da instalação de produção de energia dos Navios de Patrulha Oceânica da Marinha Portuguesa

O sistema implementado nesta classe de navios, se bem dimensionado, permitia operar nas velocidades anteriormente referidas para qualquer período de tempo, beneficiando de uma grande economia de combustível. No entanto, o que se verifica atualmente nestes navios é um grande problema de dimensionamento da sua instalação elétrica que faz com que este sistema combinado apresente algumas falhas que acabam por desvirtuar completamente o propósito inicial da sua implementação.

O que acontece com a utilização da propulsão elétrica é que, com o aumento de consumo a partir dos 8 nós de seguimento, o navio coloca automaticamente ao barramento 3 geradores à máxima potência, consumindo assim mais combustível do que os motores diesel ao mesmo regime de velocidade.

Por outro lado, existe também um problema na instalação elétrica do navio que à mínima alteração nas condições meteo-oceanográficas, é provocado um pico de consumo instantâneo que arranca automaticamente o 4º gerador. Com 4 geradores ao barramento, o consumo é, mais uma vez, muito superior do que utilizando os motores diesel para o mesmo regime de velocidade.



FIGURA 22: NRP *Viana do Castelo* (Marinha Portuguesa, 2021a)

Capítulo 2

Vantagens na adoção de sistemas de propulsão elétrica

Com a implementação de sistemas de propulsão elétrica em navios combatentes, surgem uma série de alterações que, integradas em situações e contextos específicos, trazem inúmeras vantagens nos perfis operacionais para a missão do navio, mas também vantagens igualmente relevantes para a entidade responsável pela missão em termos de limitações orçamentais, nomeadamente:

2.1 Redução do consumo de combustível

O ponto ótimo para a eficiência de um motor diesel convencional situa-se em torno dos 80% da sua Potência nominal máxima contínua, sendo que a sua eficiência é consideravelmente reduzida quando estes valores baixam dos 50%.

Com o auxílio de um sistema de propulsão elétrico, o motor principal passa a ser o próprio motor elétrico que, motivado pela extinção da ligação física entre o motor principal, engrenagens da caixa redutora e o veio, ganha a capacidade de operar na sua faixa de rendimento ótimo independentemente da velocidade de rotação do hélice, minimizando perdas de energia ao longo de toda a linha de transmissão, gerando menos desperdício de combustível, minimizando o desgaste dos componentes e aumentando a eficiência energética dos sistema em torno dos 17 pontos percentuais relativamente aos sistemas diesel convencionais. (Alves, 2007)

Com o desenvolvimento de algoritmos e sistemas de controlo e automação, torna-se ainda mais eficaz a gestão das grandes variações no perfil de funcionamento do motor elétrico, representando uma maior economia de combustível e desgaste de todos os componentes, e também nos gastos com as manutenções, possibilitando que a velocidades reduzidas permita efetuar uma navegação de forma mantida durante muitos dias.

2.2 Flexibilidade de projeto

A modularidade da propulsão elétrica é também uma das grandes vantagens deste sistema em relação aos sistemas convencionais, tendo a possibilidade dos diferentes equipamentos serem instalados em zonas distintas do navio, abrindo novas possibilidades na construção naval e até mesmo na habitabilidade do próprio navio

A adoção destes sistemas comporta, não só, uma redução significativa no volume ocupado pelos diversos equipamentos equivalentes (entenda-se como equipamentos que têm a mesma ou superior capacidade de trabalho que equipamentos com funcionamento base a combustível), mas também na eliminação de equipamentos auxiliares, pois toda a energia a bordo é produzida pelos motores principais e com a possibilidade de serem instalados em compartimentos distintos do navio, possibilitam a instalação dos Geradores juntos às zonas de admissão de ar e de extração de fumos, economizando o espaço ocupado pelas condutas de admissão.

A descentralização dos equipamentos das casas de máquinas permite efetuar uma gestão mais eficiente do posicionamento destes equipamentos, aquando da sua construção, colocando-os em áreas menos críticas no navio.

Os sistemas de propulsão elétrica caracterizam-se por produzirem muito menos vibrações e ruído no seu funcionamento, o que não inviabiliza que sejam instalados junto de compartimentos habitados.

As características acima mencionadas atribuem flexibilidade de instalação, permitindo que a implementação de sistemas de propulsão elétrica nos navios ofereça uma melhoria substancial na otimização do espaço disponível a bordo

2.3 Redução dos custos operacionais e de manutenção

Os motores elétricos, pelas suas características de operação altamente automatizadas, representam ciclos de manutenção menos frequentes e mais compassados que, aliado à eliminação de motores auxiliares - reduzindo o número de equipamentos instalados - permite também uma redução dos custos de operação, dos custos de manutenção e dos custos com reparações.

A redução da guarnição que estes sistemas permitem - como explicado anteriormente - representa grande parte redução de despesa que pode ser exercida com a implementação de sistemas de propulsão elétrica.

O número significativamente reduzido de partes móveis em motores elétricos quando comparados com motores a combustão interna permitem atender a cargas superiores de potência. Menos partes móveis resultam numa melhor eficiência de combustível, custo de aquisição, manutenção e requisitos de mão de obra reduzidos. (Doerry, Amy & Krolick, 2015)

2.4 Redução da emissão de poluentes

Seja pelo facto de os motores elétricos terem a capacidade de operar na sua faixa de rendimento ótimo, como descrito em (2.1), seja pelo crescente grau de monitorização dos poluentes emitidos com padrões mais rigorosos, seja pela consciencialização e mudança de paradigma que o mundo enfrenta, hoje em dia, relativamente ao impacto ambiental das suas atividades, a redução da emissão de poluentes para o meio ambiente tem vindo a mostrar-se como a principal bandeira das vantagens relativas à alteração do conceito convencional das instalações propulsoras a bordo dos navios.

Estudos conduzidos pelo Departamento de Engenharia Elétrica da United States Naval Academy (USNA) comprovaram que a implementação de sistemas de propulsão elétrica nos navios permitem uma redução de até 20% na emissão de poluentes para a atmosfera, quando comparados com os tradicionais sistemas de propulsão diesel. (Bastos, 2019)

2.5 Redundância de sistemas

Com a utilização de sistemas de propulsão elétrica, existe a possibilidade de, consoante a necessidade energética do navio, serem utilizados mais ou menos motores elétricos, respondendo desta forma à crescente necessidade de maiores fornecedores de energia que suprimam as necessidades energéticas de novos sistemas de armas, sensores e equipamentos auxiliares cada vez mais exigentes. Para velocidades superiores, condições Meteoceanográficas (METOC) ou em exercícios/manobras que requeiram uma elevada disponibilidade energética, poderão ser utilizados todos os motores mas, em contrapartida, em velocidades de trânsito económicas onde não seja requerida tanta capacidade energética, podem ser desligados os motores que não são necessários. Esta característica proporciona um aumento na fiabilidade, na segurança e na redundância deste sistema

Toda a energia gerada num navio de guerra elétrico pode ser disponibilizada para uma qualquer necessidade. A grande quantidade de energia disponível permite a implementação de muitos elementos de ponta relativos ao sistema de armas: como radares de alta potência, armas eletromagnéticas, lançadores eletromagnéticos e armas laser. A disponibilidade de uma grande potência permite uma mudança nos próprios sistemas de armas, bem como na forma como os sistemas de armas se integram na gestão da plataforma. Por exemplo, à medida que as armas elétricas substituem as armas e mísseis convencionais, os sistemas dos navios, como os carregadores, equipamentos de manuseio de armas, segurança do navio e sistemas de proteção, também mudarão radicalmente. (Doerry, Amy & Krolick, 2015)

2.6 Redução da assinatura acústica

Uma das grandes vantagens da implementação de sistemas de propulsão elétrica em navios combatentes é o aumento substancial na capacidade desse navio

não ser detetado por parte de unidades inimigas - particularmente importante na guerra anti-submarina (ASW) - diminuindo a sua assinatura acústica e térmica. Esta vantagem acontece, não só pela eliminação da utilização de sistemas redutores de engrenagens, como pelo facto de deixar de existir um acoplamento direto entre os motores diesel e o sistema propulsor - mas sim com os motores elétricos que, devido às suas características, emitem menos ruído e menos vibrações do que os sistemas mecânicos convencionais.

O desenvolvimento da tecnologia na área do armazenamento de energia e do aumento da sua densidade energética levará a uma progressiva adoção de sistemas integrados de armazenamento de energia a bordo como as baterias. A viabilidade da implementação destes sistemas permite aos navios aumentarem os seus padrões dos Estados de Controlo de Ruído¹, reduzindo progressivamente a sua assinatura total emitida, melhorando as hipóteses de sucesso no uso das contramedidas contra o inimigo.

2.7 Flexibilidade na distribuição de potência após a deteção de anomalias

Com a crescente eletrificação, digitalização e avanços em sistemas de automação e controlo para os mais variados sistemas que conferem a operacionalidade de um navio, seja ele, ou não, um navio militar, é cada vez mais simples e automatizada toda a sua operação, com o objetivo de minimizar ao máximo o erro e as falhas dos sistemas a bordo.

Cresce, normaliza-se e torna-se mais fácil a deteção de anomalias através da sensorização de todos os equipamentos críticos a bordo, do estudo das vibrações dos seus materiais e do processamento de sinais em softwares cada vez mais avançados. Esta é uma questão essencial quando se trata de maximizar a deteção de anomalias e da capacidade de efetuar uma rápida análise preliminar para despistar eventuais falsos positivos.

2.8 Aumento da capacidade de sobrevivência do navio

Com a capacidade da tecnologia imposta nos sistemas modernos de deteção e gestão de anomalias, distribuindo energia elétrica de acordo com as necessidades impostas pela operação do navio ou pela gestão integrada de incidentes nos seus sistemas, é possível minimizar os efeitos decorrentes destas anomalias, incidentes e de todas as pequenas falhas que surgem, naturalmente, em sistemas convencionais hidráulicos, possibilitando o correto e contínuo funcionamento de todo o complexo sistema do navio.

¹Os Estados de Controlo de Ruído têm como objetivo contribuir para minimizar as vulnerabilidades à deteção do navio por parte do inimigo e potenciar as capacidades próprias na deteção acústica

2.9 Aumento da manobrabilidade

Relativamente aos sistemas de propulsão diesel convencionais, a propulsão elétrica é normalmente mais vantajosa no que diz respeito à manobrabilidade. Tanto à capacidade de efetuar rápidas mudanças de marcha, como no controlo fino da sua velocidade, ou até na redução do raio de giração do navio.

No campo das mudanças de velocidade e alterações da marcha, o motor elétrico proporciona um controlo mais efetivo da rotação do hélice e na rápida mudança do seu passo, reduzindo assim o tempo e a distância para inícios de marcha ou navio parado de valores entre os 30% e os 50%, relativamente a um sistema de propulsão convencional, bem como uma redução no seu diâmetro táctico.

Esta característica ganha especial relevância quando falamos de situações onde é necessária uma rápida e pronta resposta à situação, mas que também é fundamental para o navio ter um controlo fino da velocidade onde, em certas situações de Homem ao Mar, Reabastecimento no mar, quando são colocadas embarcações na água ou quando se efetuam embarques de Pilotos, as consequências de uma falha de precisão se podem revelar desastrosas. (Bastos, 2019)

A utilização de propulsores azimutais atua fortemente no aumento da manobrabilidade do navio que, pela capacidade da instalação propulsora rodar em torno de si própria - habitualmente entre os 100° mas com sistemas com a capacidade para efetuar os 360° - eliminando a necessidade da utilização de leme, aumentando a eficácia que anteriormente seria a do efeito da água na porta do leme condicionada pelo sentido da marcha e pelo estado do mar, melhorando a manobrabilidade e reduzindo a necessidade da utilização de rebocadores

2.10 Redução da guarnição

Com os avanços tecnológicos na área da automação e controlo, da inteligência artificial e com o estabelecimento de avançados sistemas auxiliares de apoio que utilizam a energia elétrica como a sua fonte de energia, em detrimento dos anteriores sistemas mecânicos e hidráulicos, caracterizando-se pela elevada compatibilidade com componentes eletrónicos, com uma elevada uniformização no tipo de energia a bordo. Torna-se cada vez mais fácil, intuitivo e vantajoso do ponto de vista económico a implementação de sistemas de controlo à distância e de apoio à decisão que, tendencialmente, possibilitam a redução da guarnição de um navio.

Esta questão torna-se, especialmente, relevante em organizações que enfrentam uma escassez de recursos humanos. Particularmente na Marinha Portuguesa, têm sido crescentes as dificuldades de fixação de militares nos seus quadros, com uma redução do seu efetivo na ordem dos 30% para as duas primeiras décadas do séc. XXI, sendo cada vez mais difícil manter a esquadra bem guarnecida cumprindo com os padrões ideais de rotatividade e descanso das suas fileiras. A redução das necessidades humanas na guarnição de um navio permite, não só responder, em parte, ao problema da escassez de militares que a Marinha Portuguesa enfrenta, mas também

permite mitigar um problema cada vez mais preponderante e transversal a todas as Marinha, o dos custos operacionais das suas unidades navais. (Neves & Ufrj, 1999; Vitorino, 2016)

Capítulo 3

Novas perspectivas de propulsão

3.1 Principais desafios na adoção de sistemas de propulsão 100% elétricos

Hoje, mais do que nunca, no setor marítimo urge a necessidade de mudança de paradigma dos convencionais produtos derivados de combustíveis fósseis, como resultado das preocupações ambientais estarem a ganhar o seu espaço na agenda política e na consciencialização das sociedades, bem como através da ação da IMO e do aumento das restrições na regulamentação, por parte dos governos locais.

A propulsão elétrica, utilizando como fonte de energia sistemas de baterias, é considerada a solução com maior capacidade de solucionar o problema da poluição marítima e da emissão de gases poluentes, tendo como principal objetivo a descarbonização deste setor. Idealmente, existe ainda a possibilidade de atingir a meta da neutralidade carbónica de cada uma das navegações, alimentando as baterias com cargas efetuadas no porto através de uma rede com origem em fontes renováveis.

Graças ao desenvolvimento da tecnologia associada aos sistemas de armazenamento de energia, o número de navios alimentados por baterias tem crescido a um ritmo elevado. Por altura de Março de 2019, existiriam já 150 navios alimentados exclusivamente, ou parcialmente, por energia armazenada em baterias instaladas a bordo.

Atualmente, existem já diversos esforços por parte de organizações governamentais por forma a cumprir com as diretivas, tanto locais como internacionais, para estreitar as emissões de partículas finas em águas interiores e portos (EMSA, 2020)

- preço de combustível
- maturidade da tecnologia
- necessidade de conversões
- preço da nova tecnologia
- falta de subsídios que promovam a implementação destes novos sistemas

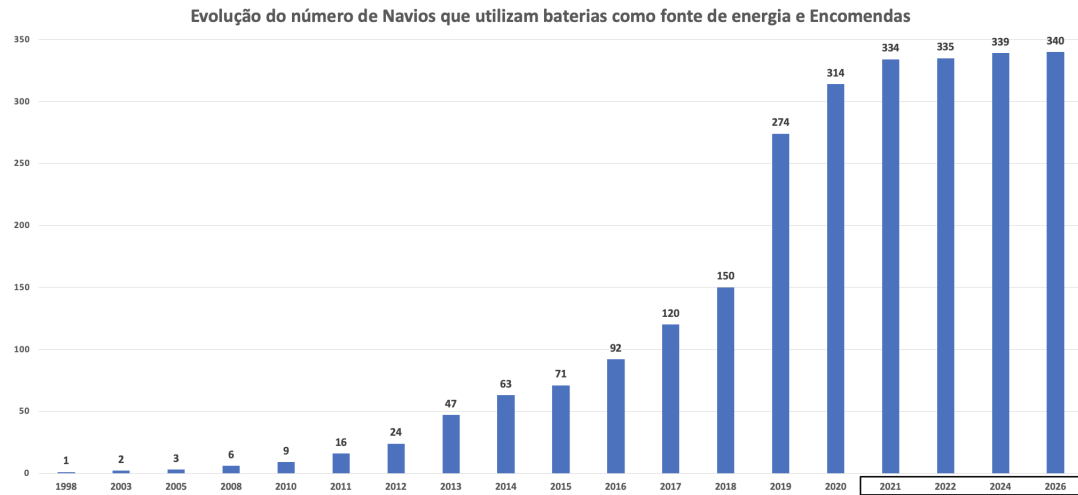


FIGURA 23: Evolução do número de navios que utilizam baterias como fonte de energia e Encomendas (EMSA, 2020)

A construção de uma unidade naval, seja ela combatente ou não combatente, que respeite todos estes critérios e que permita, no caso de navios de guerra, a implementação da mais recente tecnologia e muitas vezes de primeira geração - tecnologia que garanta o máximo de vantagem competitiva - implica imensos desafios na arquitetura do projeto, uma vez que não existem padrões de construção, e o crescente número de componentes ativos na plataforma abre caminho para o surgimento de novas situações de correlação entre equipamentos que não são passivas de uma correta antecipação, uma vez que não existe um histórico bem definido, por nunca sido experienciadas.

O conhecimento imperfeito do comportamento dos materiais e equipamentos conduz os arquitetos navais a confiar fortemente em dados experimentais, regras empíricas e em experiências passadas que sofrem um enviesamento. Esta situação sofre ainda uma agravante quando, por ser aplicada repetidamente, força a adoção de técnicas de tentativa e erro para determinadas fases e experiências do projeto. Esta técnica é especialmente imperfeita quando aplicada em sistemas que apresentam tais níveis de complexidade e inovação. (Sulligoi, Vicenzutti & Menis, 2016)

Neste sentido, e como novos problemas requerem soluções diferenciadas, surgem novos sistemas que simplificam a sua resolução, como software de gestão e distribuição de energia (ESS), ou a construção de equipamentos em bloco (PEBB) (Ericson, Hingorani & Khersonsky, 2006; Monti et al., 2008) permitindo, não só um estudo de processos e design, mas também que permita inferir o impacto que estes novos componentes representam no sistema do navio como um todo, ampliando em grande número o espectro de variáveis que podem ser consideradas, diminuindo a dependência de regras empíricas e métodos de tentativa e erro e apoiando a compreensão do comportamento destes sistemas inovadores. (Britannica, 2018)

Adicionalmente, quando falamos em tecnologia de ponta, é muitas vezes referido o conceito de Retrofitting, conceito que permite às plataformas já existentes reconversões com vista à implementação de novos sistemas que permitam trazer os

mais diversos benefícios, a preços muitas vezes bastante inferiores. No setor marítimo, derivado das ordens de grandezas existentes, é bastante comum encontrarmos novos desenvolvimentos posteriores à data de construção dos navios, renovando assim os navios já com alguma idade, melhorando as suas capacidades e performances, mas também com vista a adaptar estas plataformas aos novos requisitos e regulamentação. Este processo requer a instalação de novos sistemas em navios, muitas vezes, já bastante antigos, necessitando por isso de análises bastante precisas, com o objetivo de garantir a correta integração dos sistemas. Para o seu sucesso, não são apenas as questões de design são examinadas, mas também as instalações propulsoras. As alterações efetuadas posteriormente no sistema de fornecimento de energia poderão originar discrepâncias entre os valores que estão estabelecidos e os que efetivamente são medidos.

Todos estes desempenhos poderão ser previstos via campanhas de análise e previsão através de software's dedicados para o efeito. É, então, possível garantir a melhor integração possível dos sistemas com a mais recente tecnologia, em plataforma já existentes, nunca abdicando da investigação de novos procedimentos tecnológicos e de design.

Uma das questões mais sensíveis na construção de um navio ocorre devido ao facto de a grande maioria das decisões de design e arquitetura serem tomadas em estágios muito preliminares de todo o processo. Este problema é particularmente sensível quando falamos em implementações de novos sistemas e tecnologia, uma vez que muito pouca informação relativa ao comportamento dos novos materiais e das novas dinâmicas da plataforma é conhecida, que poderá levar a que sejam tomadas decisões pouco informadas, baseadas em informação incerta e em hipóteses pouco validadas.

No caso do projeto de navios e embarcações não combatentes, o conhecimento existente será, em toda a medida, adequado para prever corretamente a sua melhor arquitetura, tornando mais fácil abordar os possíveis erros e discrepâncias que poderão ocorrer em estágios mais avançados do projeto. Por outro lado, toda a fase de projeto torna-se bastante mais complexa quando abordamos a construção de navios combatentes, englobando sistemas de propulsão e sistemas de combate bastante complexos, onde ocorrem permanentes atualizações na luta pela vantagem competitiva. A investigação neste setor visa desenvolver sistemas que auxiliem no planeamento e construção do projeto onde, graças a estes programas, é possível testar diferentes soluções de arquitetura e design, avaliando indicadores performance de diferentes configurações e arranjos, como pesos, volumes, fiabilidade e custos. A comparação destes resultados permite inferir a melhor configuração e design para os diferentes perfis operacionais de cada navio, mesmo nos casos onde existem novas configurações.

Com a utilização destes software em fases embrionárias do projeto, existe a capacidade de construir os navios mais avançados tecnologicamente e, ao mesmo tempo, assegurar um design não só competente, mas também com um nível de otimização muito perto do melhor que é possível efetuar com a tecnologia desenvolvida, graças à oportunidade de, durante as fases iniciais da sua construção, serem tomadas

decisões relevantes, informadas e conscientes do seu impacto no resultado final do processo de design do navio. (Sulligoi, Vicenzutti & Menis, 2016)

3.1.1 Densidade energética dos módulos de baterias

As baterias têm enfrentado um desenvolvimento exponencial com um aumento, não só, no tipo de materiais com que são feitas - com materiais cada vez mais sustentáveis - mas também no seu tamanho e densidade energética.

O desenvolvimento deste segmento tem sido rápido e sustentado, tendo já conseguido avanços em termos da quantidade de ciclos de carga e da sua densidade energética. Este desenvolvimento de tecnologia, aliado à crescente redução de custos por unidade de energia tem tornado cada vez mais possível a implementação destes sistemas de armazenamento como o principal meio de fornecimento de energia a grandes navios, em segmentos de operação diferenciados, e com taxas de reciclagem superiores a 90%. (Bjorn-Johan, Sverre & Oystein, 2017)

O valor da densidade energética de um pack de baterias composta por íões lítio, níquel, cobalto e alumínio (NCA) situa-se atualmente nos 0,14-0,38 kg/kWh - levando a que uma bateria convencional com capacidade de 9MWh possa ter até 5,5 toneladas de peso total - por sua vez, as previsões de futuro a 10 anos indicam que uma química composta por íões de níquel, manganês e cobalto (NMC) possam atingir os 0,09 kg/kWh - reduzindo este peso total para menos de 1 tonelada, com benefícios claros de projeto.

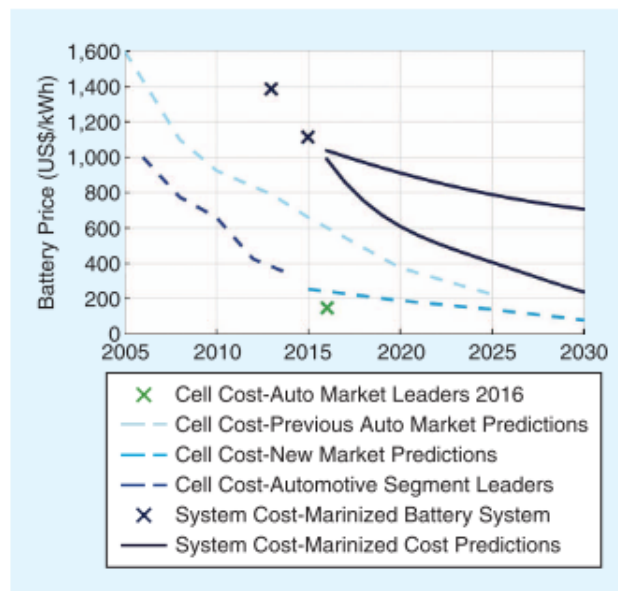


Figure 5. Battery cost development (automotive and maritime).

FIGURA 24: Evolução do custo de produção de Baterias desde o ano de 2005 com previsão a 10 anos (Bjorn-Johan, Sverre & Oystein, 2017)

A redução dos custos por unidade de energia deve-se, maioritariamente, ao aumento do volume de produção das baterias, mas também ao aumento da eficiência

das cadeias de armazenamento e fornecimento de energia. (DNV GL, 2020; EMSA, 2020)

3.1.2 Motores síncronos de ímanes permanentes

Esta tecnologia, baseada num conjunto de ímanes permanentes no próprio rotor, representa uma solução muito promissora na aplicação em sistemas de propulsão para navios híbridos e elétricos, uma vez que estes motores se caracterizam por elevados padrões de potência e binário, bem como um elevado desempenho em condições de múltiplos regimes de carga. Uma vez que este tipo de ímanes tem uma elevada densidade energética, muito superior ao motor de indução mais convencional, têm vindo a surgir cada vez mais como uma solução aprimorada para a aplicação em navios, abrindo ainda mais o leque de viabilidade dos mesmos. (Melo, 2017)

TABELA 5: Comparativo entre Motor de Indução e Motor Síncrono de Ímanes Permanentes (Melo, 2017)

| | Indução | Ímanes Permanentes |
|-----------------------|-----------|--------------------|
| Densidade de Potência | Média | Muito Boa |
| Rendimento | Bom | Muito Bom |
| Custos | Muito Bom | Mau |
| Fiabilidade | Muito Bom | Média |
| Maturidade | Bom | Média |

Capítulo 4

Análise Estatística

4.1 Amostragem

Objetivos de estudo

Os Navios Hidrográficos e os Submarinos operam exclusivamente com recurso a propulsão elétrica, variando apenas na forma como obtêm a energia para os motores elétricos. Enquanto nos Navios Hidrográficos a sua operação se diferencia apenas na utilização de mais ou menos geradores ao barramento consoante as suas necessidades energéticas - nos Submarinos, a única diferença reside na maneira como se obtém a energia necessária para o motor elétrico, onde maioritariamente se opera com a bateria ao consumo e apenas quando necessário se efetua o seu carregamento, com recurso aos geradores ou à célula de combustível, tal como descrito em (1.2.8).

Por outro lado, como referido em (1.5.1), os navios de patrulha oceânica caracterizam-se por uma instalação propulsora diesel convencional aliada à propulsão elétrica, dispondo para cada linha de veios de um motor diesel e um motor elétrico.

Posto isto, e acordo com a tipologia do navio e respetivo tipo de missão, tentou-se entender junto de cada operador, se é considerada benéfica a utilização dos sistemas de propulsão elétrica nas suas missões e em que casos se opta por não a utilizar; se existe falta de formação adequada para a sua utilização e se esse é um dos seus entraves; se existem critérios de segurança limitativos e quais os desenvolvimentos que poderão vir a efetivar a sua utilização nas unidades navais.

Técnica de amostragem e método de recolha dos dados

Neste estudo, foi efetuada uma amostragem do tipo não probabilística por julgamento, onde os elementos da amostra foram selecionados tendo por base a crença de que, pelo cargo que desempenhavam à data do questionário, as informações que esses elementos pudessem fornecer ao estudo fossem os mais representativos da realidade que se pretendia estudar.

No processo de Amostragem, não foram incluídos elementos que pudessem já ter experienciado a realidade a ser estudada, por dois motivos. Primeiramente porque, apesar de serem informações bastante válidas e suportadas por uma grande

experiência de carreira, correríamos o risco de aumentar o viés dos dados devido a experiências e acontecimentos vivenciados posteriormente à realidade a ser estudada, mas também pela distância temporal entre realização dos questionários e efetiva experimentação da realidade sobre qual estariam a dar resposta. O segundo motivo pelo qual esses elementos não foram incluídos foi por questões de conveniência, uma vez que devido, ou à incerteza e volatilidade do planeamento operacional dos navios onde se encontram muitos desses elementos, ou ao facto de os restantes elementos desse grupo não se encontrarem facilmente acessíveis ao entrevistador, o que iria provocar uma dispersão de recursos e influenciar outras fases do processo de análise. (Afonso & Nunes, 2019)

Relativamente ao método de recolha dos dados que permitissem retirar as conclusões necessárias, respondendo aos objetivos de estudo propostos, foi utilizada a modalidade de recolha presencial de questionários em formato de papel, mas também no formato digital.

4.2 Consistência e fiabilidade dos dados

Coeficiente Alfa de Cronbach

Por forma a testar a consistência interna dos dados obtidos numa recolha estatística, foi criado em 1951 por Lee J. Cronbach um coeficiente que tomou o seu nome, com o objetivo de medir o grau de correlação entre as respostas de cada questionário, através da sua variância. Este coeficiente é amplamente adotado no meio académico para testar a fiabilidade dos dados em análise estatística, e ele deve ser encontrado no intervalo entre 0 e 1, onde 1 representa uma correlação e consistência máxima entre as respostas dessa questão, e valores próximos de 0 representam uma dispersão bastante acentuada entre os mesmos, sem correlação estimada entre si, procurando sempre um coeficiente de fiabilidade $\geq 0,7$ para dimensões de dados superiores a 10 elementos. (da Hora, Monteiro & Arica, 2010)

TABELA 6: Consistência dos Dados segundo o cálculo do Coeficiente Alfa de Cronbach

| Nº da Questão | Coeficiente Alfa de Cronbach |
|---------------|------------------------------|
| Q3 | 0,62 |
| Q4 | 0,94 |
| Q5 | -0,35 |
| Q6 | 0,09 |
| Q7 | -1,84 |
| Q8 | -0,59 |

Após o cálculo do Coeficiente de Cronbach para os dados obtidos nas diversas questões sumariadas na tabela e representadas em 4, importa referir que a questão 3 - relativa às condicionantes à utilização dos Sistemas de Propulsão elétrica - e a questão 4 - relativa aos regimes de velocidades utilizados com a Propulsão

Elétrica - foram as questões que obtiveram melhores resultados nos testes de consistência de resultados segundo o coeficiente Alfa de Cronbach, para valores de 0,62 e 0,94 respectivamente. Estes valores são indicativos de uma forte consistência nas respostas dadas a estas questões, indicando que as opiniões dos entrevistados são consensuais e apresentam uma forte correlação entre si, como será abordado de seguida.

Contudo, importa referir que esta análise não substitui em toda a parte a crítica do pesquisador e deve servir para o aconselhar à cerca da pertinência e da relevância que determinado item representa nesse levantamento de dados. Olhando para os coeficientes com valores negativos, eles podem ser facilmente explicados por uma falta de correlação entre itens, onde não é possível inferir algum dos elementos com a observação dos resultados de outro. Esta conclusão diz-nos apenas e só, que não é possível retirar, segundo este autor, uma inferência estatística dos restantes parâmetros analisados (Q5, Q6, Q7, Q8). Ainda assim, é possível retirar conclusões válidas e fidedignas sobre cada uma das respostas obtidas no levantamento dos dados, como veremos mais à frente no capítulo.

4.3 Caracterização da amostra

Ao conduzir uma análise estatística, nem sempre é possível considerar completa e detalhadamente a totalidade da população que se pretende estudar e/ou retirar conclusões, quer seja pelas suas grandes dimensões, que tornaria o processo de obtenção de dados bastante difícil, ou pela economia de recursos escassos, como o tempo ou a mão-de-obra. Por forma a conseguir obter uma amostra de dados que sejam o mais fielmente representativos possível de toda a população que queremos estudar, é necessário efetuar uma distinção clara de dois termos - População e Amostra.

População Conjunto de todos os elementos que partilham uma, ou mais, características e sobre os quais se pretende retirar conclusões. A precisão na definição da dimensão desta componente será tanto maior quanto menor for o seu valor, uma vez que aumenta o seu impacto estatístico.

Amostra Grupo de elementos que pertencem à População, e que se pretende que sejam o mais representativos possível da mesma. Ao processo de seleção desta nova componente dá-se o nome de Amostragem.

A amostragem é um processo de grande importância no estudo estatístico, uma vez que permite retirar conclusões sobre toda uma população através de apenas uma amostra da mesma. No entanto, é fundamental que esta amostragem seja muito bem definida e organizada, e essa competência é desenvolvida logo a partir do primeiro momento, uma vez que a forma como as questões são colocadas pode ditar que a informação que recolhemos dos questionários não seja a mais adequada para responder àquilo que são os objetivos de estudo.

Assim, foi selecionada uma amostra de 24 elementos, distribuídos por 3 tipos diferentes de navios - Navios e Lanchas Hidrográficas, Navios de Patrulha Oceânica e Submarinos. A distinção do tipo de navio é feita na medida que o perfil operacional de cada classe de navios, a sua instalação geradora de energia e propulsora e o tipo de missão variam com o mesmo, como descrito em (4.1).

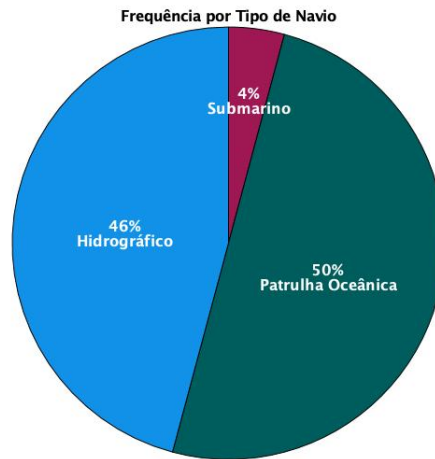


FIGURA 25: Frequência de Respostas por tipo de Navio

Na figura 25 encontra-se representada a distribuição das respostas de acordo com os diferentes tipos de navio, segundo um gráfico circular. Podemos observar que as respostas obtidas em Navios de Patrulha Oceânica representam a maioria dos entrevistados (50%), enquanto que os entrevistados provenientes de Submarinos são apenas 4% do total das entrevistas.

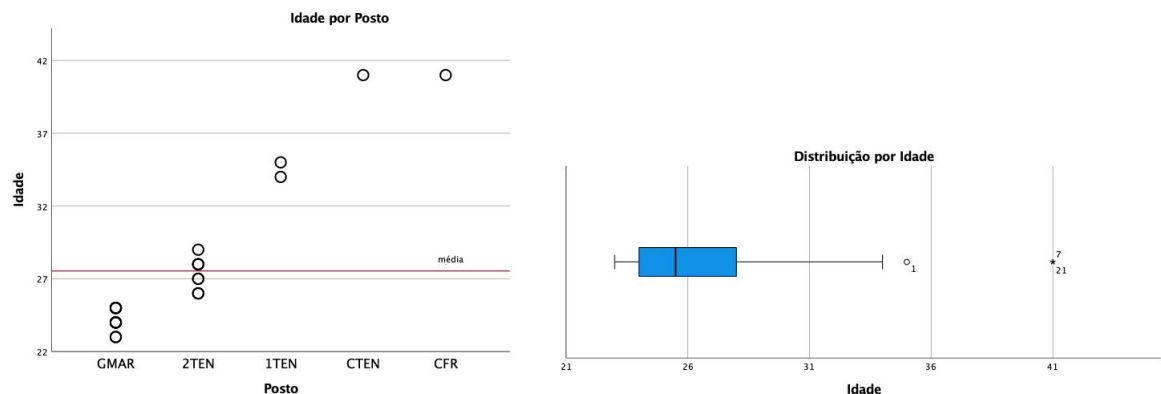


FIGURA 26: Representação da Idade dos Entrevistados

Relativamente ao perfil dos entrevistados, podemos observar um valor de Mediana de 25 anos e 6 meses e com o valor Médio situado nos 27 anos e 5 meses, o que nos indica claramente que os dados apresentam uma distribuição assimétrica com uma maior prevalência da faixa etária dos 24 aos 27 anos. Apenas 1/4 dos entrevistados tem idade igual ou superior a 27 anos.

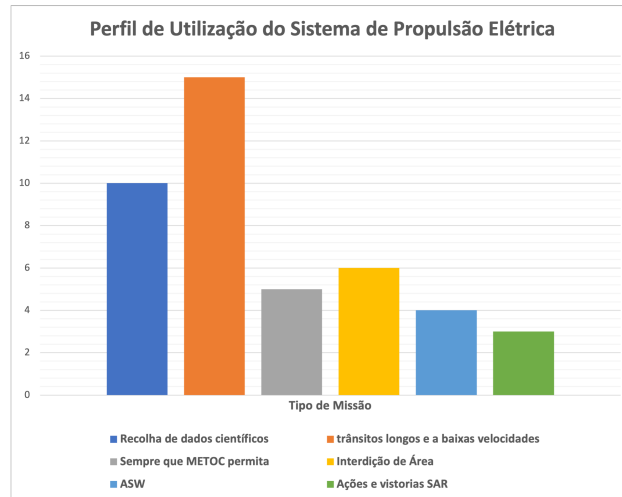


FIGURA 27: Perfil de Utilização do Sistema

De acordo com o Perfil de Utilização da propulsão elétrica a bordo dos navios inquiridos, podemos constatar que esta é utilizada maioritariamente em trânsitos longos e de baixa velocidade, privilegiando os baixos consumos. A utilização para recolhas de dados científicos, interdição de área, missões anti-submarinas, ações e vistoria SAR são outros tipos de missão onde estes sistemas são utilizados.

Por outro lado, mais de 10% dos inquiridos referiram que privilegiam a utilização da propulsão elétrica sempre que as condições METOC o permitam. Como referido em (1.5.1), esta é uma das limitações deste sistema, que perde a sua eficácia quando enfrenta pequenas perturbações nas condições meteo-oceanográficas.

4.4 Análise de resultados

4.4.1 Análise SWOT

Segundo o autor Erhard Valentin em (Valentin, 2001), uma análise SWOT (FOFA, em Português) caracteriza-se por identificar e analisar os principais pontos fortes e pontos fracos de um produto, projeto ou empresa que se pretenda implementar ou aumentar o seu rendimento. Tem como principal objetivo produzir uma perceção estratégica baseada no estudo de ambos os ambientes internos (Forças e Fraquezas) e externos (Oportunidades e Ameaças), por forma a maximizar o rendimento da sua implementação, tal como representado na tabela 2.

As típicas diretrizes do procedimento estratégico consistem, em grande parte, em questões um pouco abrangentes e, por vezes, desprovidas de fundamentos teóricos explícitos. Muitas vezes, elas produzem resultados algo enganadores ou demasiado superficiais. As percepções estratégicas mais conscientes podem ser obtidas segundo as diretrizes de uma análise SWOT, derivadas da teoria contemporânea do planeamento estratégico, alicerçadas numa visão da empresa que valoriza as competências dos seus recursos. (Valentin, 2001)

Esta análise estratégica é importante na medida em que é utilizada como uma ferramenta que apoia a tomada de decisão perspectivando oportunidades futuras, ultrapassando as fraquezas do projeto. Ela não deve ser considerada válida, por si só, porque incorre no risco de se tornar demasiado simplista, pelo que é recomendado pelos autores que seja utilizada em conjunto com outras análises com vista a uma tomada de decisão mais consciente e informada. Por outro lado, uma análise SWOT apresenta um elevado grau de flexibilidade e de resiliência, adaptando-se facilmente a alterações de características ou de ambiente. Esta avaliação permite traduzir o nível de impacto que cada um desses fatores representa no processo de implementação do projeto, permitindo adequar a estratégia e antecipando constrangimentos que possam surgir²

Análise do ambiente

Ambiente externo

Uma adequada análise do ambiente externo à utilização dos sistemas de propulsão elétrica permite efetuar uma constante avaliação da informação relativa ao meio envolvente do seu projeto, avaliando a sua dinâmica e monitorizando toda a informação. Esta avaliação iterativa tem como principal finalidade evitar surpresas estratégicas e assegurar o melhor desempenho na implementação destes sistemas.³

Assim, foram identificados as seguintes oportunidades e ameaças:

- Oportunidades
 - Aproveitar a vantagem competitiva, tomando uma posição na vanguarda dos sistemas de propulsão elétricos e híbridos, aproveitando as vantagens operacionais de ambos os sistemas, correspondendo às restrições ambientais impostas pelos organismos reguladores;
 - Antecipar o restringimento das medidas de mitigação dos impactos ambientais;
- Ameaças
 - O sucesso da implementação de tecnologias com níveis de rendimento bastante superiores, como é o caso da fissão nuclear, apenas acessíveis a grandes potências militares;
 - O surgimento de tecnologias emergentes, como a fusão nuclear;
 - Com a viabilidade de sistemas alternativos, o desenvolvimento desta tecnologia pode nunca vir a atingir a maturidade necessária para a sua implementação no setor militar naval.

²(Silva Ribeiro, 2020), op.cit., p. 144.

³Silva Ribeiro, op.cit., p. 138.

Ambiente interno

Por outro lado, uma análise das capacidades e das valências internas é bastante importante porque nos permite, não só entender quais as variáveis que nos poderão vir a proporcionar um qualquer tipo de vantagem estratégica - visada nas Forças - mas também identificar quais são as vulnerabilidades que poderão afetar o sucesso do projeto - visada nas Fraquezas.⁴

As Forças e as Fraquezas são identificadas por Silva Ribeiro como Capacidades Estratégicas, e onde o seu domínio é fundamental para facilitar, ou dificultar, a superação de problemas e eventualidades causadas pelo Ambiente Externo

Como anteriormente referido intensivamente em (2), a adoção de sistemas de propulsão elétrica é caracterizada pelas seguintes potencialidades:

- Forças
 - Redução do consumo de Combustível;
 - Flexibilidade de projeto;
 - Redução dos custos operacionais e de manutenção;
 - Redução da emissão de poluentes;
 - Redundância de sistemas;
 - Redução da assinatura acústica;
 - Flexibilidade na distribuição de potência após deteção de anomalias/incidentes;
 - Aumento da capacidade de sobrevivência do navio;
 - Aumento de Manobrabilidade;
 - Redução da Guarnição.
- Fraquezas
 - Baixas velocidades, que limitam o perfil operacional do navio;
 - Deficiências no projeto provocam diminuição da eficácia do sistema;

Caracterizado o ambiente geral da área de interesse das novas perspetivas de propulsão, é possível perspectivar uma linha temporal que se estende no longo prazo e identificar as principais tendências no setor dos navios combatentes.

Como descrito em (Doerry, Amy & Krolick, 2015), uma estratégia nacional para a defesa é bastante importante numa resposta às ameaças e às capacidades tecnológicas de outras nações. Essas ameaças são incertas e mudam com o passar do tempo.

Reconhecendo essa incerteza e mudança tecnológica ao longo do tempo, é fundamental compreender corretamente cada um dos parâmetros da análise SWOT.

⁴Silva Ribeiro, op.cit., p. 138.

As tendências futuras serão análogas às tendências históricas de adoção de tecnologia naval em geral e, especificamente, às tendências de adoção de tecnologia de energia elétrica, surgindo como uma grande oportunidade de vantagem tecnológica a exploração e desenvolvimento tecnológico na área dos novos sistemas de propulsão e de produção de energia a bordo.

Considera a Propulsão Elétrica uma mais valia na missão do seu navio?

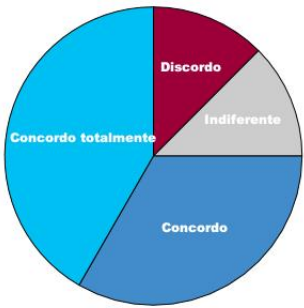


FIGURA 28: «Considera a Propulsão Elétrica uma mais valia na missão do seu navio?»

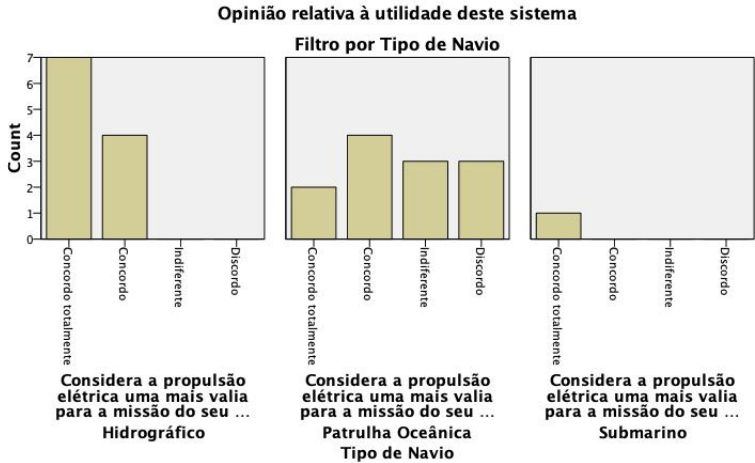


FIGURA 29: Utilidade do Sistema de Propulsão elétrica, por Tipo de Navio.

Após a análise dos resultados, é possível concluir que a opinião generalizada dos entrevistados (75% das existências) considera que a utilização do sistema de propulsão elétrica representa uma mais valia para o seu navio.

Observando mais a fundo, a opinião é menos consistente quando filtrada por tipo de navio, existindo uma maior certeza na utilização do sistema nos navios que apenas contêm os motores elétricos como meio de propulsão e onde a sua utilização é fundamental.

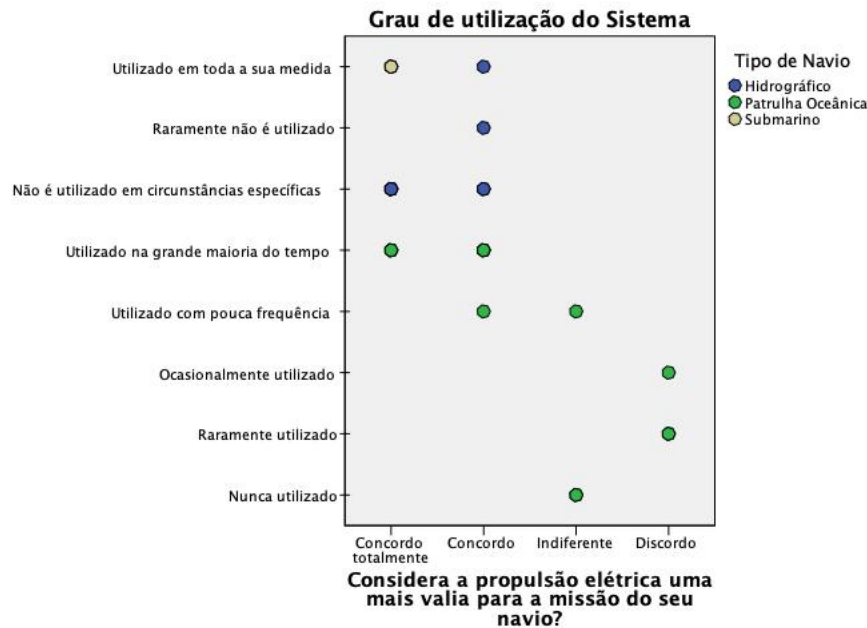


FIGURA 30: Opinião de utilidade do Sistema de Propulsão Elétrica, por grau de utilização do mesmo

Como podemos observar no gráfico (30), o grau de utilização do sistema de propulsão elétrica está inversamente relacionado com a opinião dos operadores em relação à utilidade destes sistemas no seu navio. Nos submarinos e dos navios hidrográficos, onde a propulsão se faz exclusivamente com recurso a motores elétricos, diferindo apenas na forma como essa energia é gerada - recurso a geradores diesel para ambos os casos, tendo o submarino ainda o recurso à célula de combustível, como mencionado em (1.2.8) - para além de apresentarem uma elevada taxa de operação com os mesmos, este fator também se faz representar na opinião que os seus utilizadores têm relativamente à sua utilização.

Por outro lado, as baixas taxas de utilização do sistema de propulsão elétrica, como descrito em (1.5.1), são amplamente explicadas pelo problema de dimensionamento de projeto dos Navios de Patrulha Oceânica, mostrando-se como o principal causador desta dificuldade sentida pelos operadores onde, apesar das potencialidades e da elevada aplicabilidade do sistema no perfil operacional desta classe de navios, devido às dificuldades encontradas na sua concretização, estes acabam por colocar

de lado a sua utilização, uma vez que não oferece as mesmas garantias da propulsão diesel convencional.

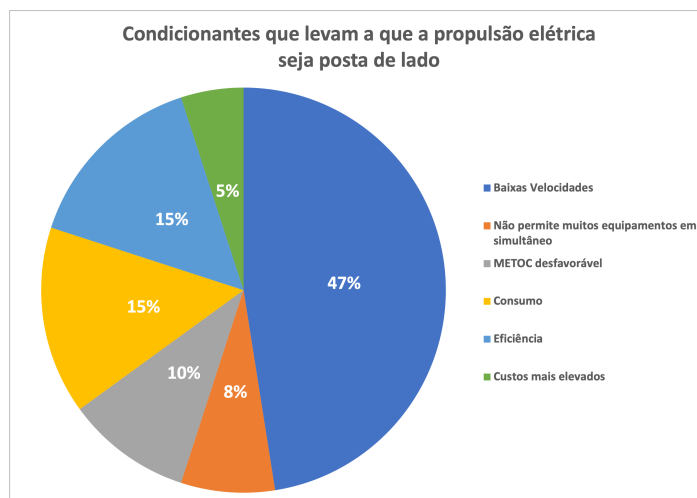


FIGURA 31: Condicionantes à utilização dos Sistemas de Propulsão Elétrica

Quando questionado à cerca das condicionantes que levam a que a propulsão elétrica seja posta de lado, as limitações de velocidade representam praticamente metade das respostas (47%), seguindo-se pelo Consumo e Eficiência (ambos com 15%).

O consumo e/ou a eficiência foram referidos por 30% dos entrevistados como sendo uma limitação crucial à utilização destes sistemas, tal como descrito em (1.5.1). Esta limitação é comumente mitigada pela utilização da propulsão diesel convencional uma vez que, devido às falhas no dimensionamento do sistema de propulsão elétrica, a sua utilização aumenta em grande número o consumo de combustível e diminui a eficácia do sistema.

Por forma a entender qual a dimensão das limitações de velocidade que a propulsão elétrica impõe, relativamente à propulsão diesel convencional, foram analisadas as respostas relativas à questão «A que regimes de velocidade é utilizado o sistema de propulsão elétrica, a bordo do seu navio?». Adequando, posteriormente, os dados por forma a obter uma representação da realidade dos Navios que detêm, efetivamente, esta alternativa, os resultados foram claros. A propulsão elétrica é amplamente utilizada a baixas velocidades - até aos 8 nós - beneficiando da sua faixa de rendimento ótimo como descrito em (2.1).

De acordo com o disposto em (1.5.1) e comprovado pelo dados deste gráfico, é a partir dos 8 nós de velocidade que a utilização da propulsão elétrica cai drasticamente nestes navios. A partir deste regime de velocidades existe um aumento substancial do consumo de combustível, sobrepondo-se ao consumo da propulsão diesel convencional e desvirtuando completamente o propósito do baixo consumo, alta eficiência e grande autonomia.

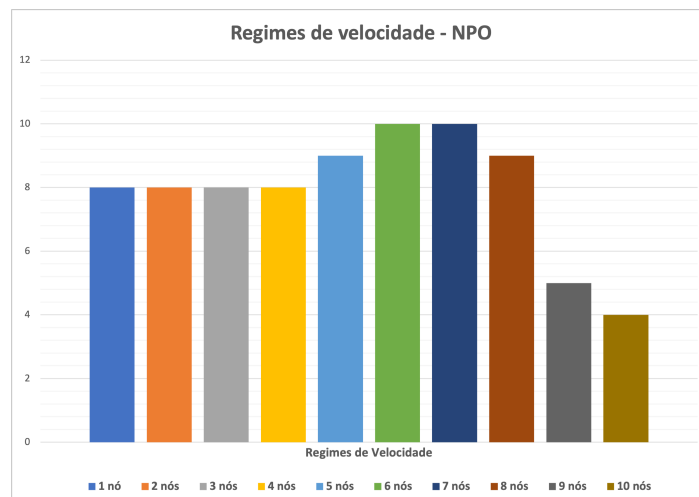


FIGURA 32: Regimes de Velocidade identificados por Operadores dos Navios de Patrulha Oceânica

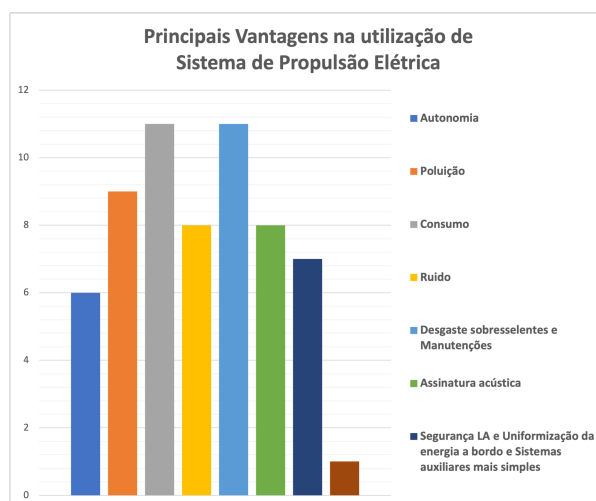


FIGURA 33: «Quais as principais vantagens na utilização da Propulsão Elétrica no seu navio?»

Quando questionados à cerca das principais vantagens da utilização da propulsão elétrica nos seus navios, 36% dos inquiridos referiram que consideram principalmente os baixos consumos e a diminuição da manutenção derivada do baixo desgaste dos sobresselentes, descrito em (2.3). As baixas emissões de poluentes foram resposta transversal às 3 classes de navios e ocuparam o segundo posto na escolha dos operadores, mostrando uma crescente consciencialização ambiental.

Os baixos níveis de ruído e de assinatura acústica foram dois elementos considerados bastante relevantes, não só para os entrevistados que servem navios com missões de componente anti-submarina atribuídas, mas também nas restantes classes como um fator bastante importante no aumento do conforto nas navegações.

Genericamente, os inquiridos foram confrontados com as diversas vantagens

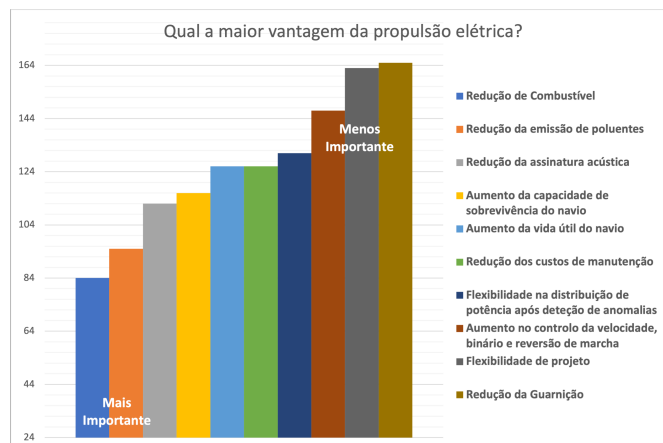


FIGURA 34: «Qual a maior vantagem da propulsão Elétrica?»

na implementação de um sistema de propulsão elétrica descritas em (2) e representadas na legenda dos dados do gráfico acima, tendo sido questionado no sentido de efetuarem uma ordenação consoante o nível de importância que atribuem a cada uma delas - iniciando no valor 1 como a mais vantajosa e terminando no 10 como a menos útil.

Os resultados desta ponderação encontram-se representados na figura (34) e mostram como os operadores consideram como mais relevantes as questões relacionadas com a economia de combustível e da redução da emissão de poluentes. Esta opinião demonstra um claro sentido de responsabilidade pelo impacto da ação que cada indivíduo tem no planeta, apesar de muitas vezes não ser possível materializar esta preocupação com o tipo de missão atribuída a um navio combatente.

A redução da assinatura acústica surge como a terceira maior vantagem na adoção destes sistemas, característica muito relevante em submarinos, navios com capacidade anti-submarina, mas também em navios de prospecção científica como é o caso dos navios hidrográficos ou outro tipo de navios quando a efetuar este tipo de missão.

De seguida, surgem as vantagens que permitem a longevidade da plataforma: Um aumento de vida útil do navio com uma redução dos custos de manutenção e uma melhor flexibilidade na distribuição de potência após a deteção de anomalias, demonstrando que existe uma preocupação acrescida com a preservação dos próprios navios, com vista a um aumento da sua longevidade. Diminuindo, não só, os custos de operação, mas também o seu desgaste e consequentemente aumentando a qualidade de vida a bordo das unidades navais.

O aumento no controlo da manobra da plataforma surge em antepenúltimo lugar, podendo justificar-se pelo facto de, na sua totalidade, os entrevistados operarem em navios que já se caracterizam por uma boa reação e uma elevada manobrabilidade, não sentido falta desta característica. Em casos com diferentes particularidades e características evolutivas, como é o exemplo de navios mais lentos a manobrar, faz todo o sentido a implementação destes sistemas com o objetivo de melhorar a sua manobrabilidade. O mesmo se pode dizer com a vantagem da

Flexibilidade de Projeto que, não sendo um dos aspetos que recai diretamente sobre a ação dos entrevistados, acaba por não ter influência sob a sua opinião. recaindo para penúltimo nas suas escolhas.

Por último, e um pouco inesperadamente tendo em conta que a Marinha Portuguesa é uma instituição que sofre, ano após ano, de problemas relacionados com a falta de pessoal nas suas fileiras - tal como descrito em (2.10) - surge a questão da Redução da Guarnição como a vantagem menos preponderante nas escolhas dos entrevistados. Este facto demonstra que - uma vez que, nos últimos anos, tem havido uma grande redução das guarnições dos navios (na ordem dos 30%, como descrito em (2.10)) - os entrevistados não se sentem minimamente confortáveis para continuar a sofrer quebras de elementos nas suas equipas, comprometendo a operacionalidade da unidade naval e o cumprimento da missão a si atribuída.

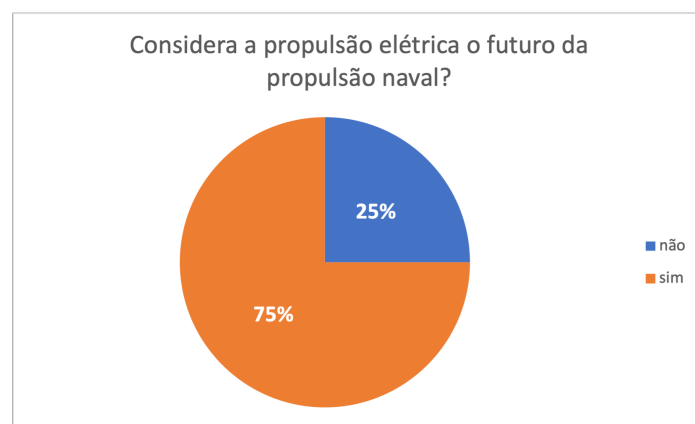


FIGURA 35: «Considera a propulsão elétrica o futuro?»

Por forma a finalizar o questionário, foi pedida a opinião dos entrevistados em relação a qual consideram ser o futuro da propulsão elétrica aplicada ao setor naval. As respostas foram indubitavelmente positivas, com 3/4 dos inquiridos a demonstrar certezas de que as vantagens que a propulsão elétrica em navios combatentes permite para os diferentes tipos de missão, suplantam em larga escala as limitações que têm surgido no processo de implementação nos seus navios.

Conclusão

Após uma análise do panorama climático, com o crescimento das restrições impostas pelas entidades regulamentadoras marcadas, não só pela redução das emissões de gases poluentes como também pelas restrições à circulação dentro de determinadas áreas específicas (ECA's) e o aumento da quantidade dessas áreas, concluiu-se que o surgimento de novas e diferenciadas soluções de propulsão híbridas e 100% elétricas nos transportes via marítima - setor responsável por 14% de toda a poluição emitida para a atmosfera - tem sido um importante motor no desenvolvimento de toda a tecnologia a si associada. Este desenvolvimento possibilita uma série de soluções para navios que, apesar de se caracterizarem pelas instalações propulsoras convencionais diesel, pretendem responder às regulamentações impostas pela comunidade internacional e reduzir a pegada carbónica da sua operação. Estes mecanismos de redução de emissão de produtos da combustão são bastante importantes para o avanço dos novos sistemas de propulsão porque permitem às empresas manter a sua operação, conseguindo corresponder às restrições a si impostas, enquanto procuram formas de se adaptar ao novo paradigma, deixando também espaço para a tecnologia ser cada vez mais apurada e eficaz.

O desenvolvimento da tecnologia associada à propulsão 100% elétrica - nomeadamente aos motores elétricos, aos sistemas de armazenamento de energia, às células de combustível e aos sistemas que permitem uma integração completa e eficaz da produção e distribuição de energia - tem alargado o espectro de valências destes sistemas e tornado cada vez mais viável a sua adoção para navios combatentes.

A viabilidade da implementação de novos sistemas de propulsão e de armazenamento de energia foi comprovada numa opinião clara por parte de operadores que utilizam estes mesmos sistemas, onde mais de 2/3 dos entrevistados afirma um elevado grau de utilidade destes sistemas para a missão do seu navio, com 75% deles vendo mesmo na propulsão elétrica o futuro da propulsão naval, com vantagens que passam pela redução do consumo de combustível, pela melhoria nas questões ambientais ou pelo aumento da capacidade furtiva do navio.

Face à grande versatilidade da tecnologia associada à propulsão elétrica, é importante retirar dela o maior rendimento possível uma vez que a mesma representa uma melhoria significativa nos diversos aspetos mencionados no capítulo das suas vantagens (2). No entanto, e concretamente nos navios da classe «Viana do Castelo», é crucial efetuar uma intervenção profunda na sua instalação elétrica, por forma a recuperar a sua capacidade total de operação. Um aumento de potência seria um aspeto importante a ser estudado para a mitigação dos problemas de dimensionamento, uma vez que o sistema iria ser capaz de dar uma resposta mais

capaz às superiores necessidades energéticas que surgem em velocidades a partir dos 8 nós e nas condições de navegação adversas que provocam os picos de consumo.

Como perspectivas de futuro projeto poderá ser efetuado um estudo de implementação de um sistema integrado de armazenamento de energia a bordo de um Navio Hidrográfico que permita suprir todas as necessidades energéticas do navio e efetuar uma navegação completa, ou um troço da navegação, com recurso exclusivamente às baterias. Para este estudo será necessário definir corretamente todas as necessidades energéticas da unidade, um estudo das vantagens e desvantagens das diferentes químicas de baterias e efetuar um dimensionamento do pack de baterias a bordo do navio, respondendo a todos os seus requisitos de estabilidade.

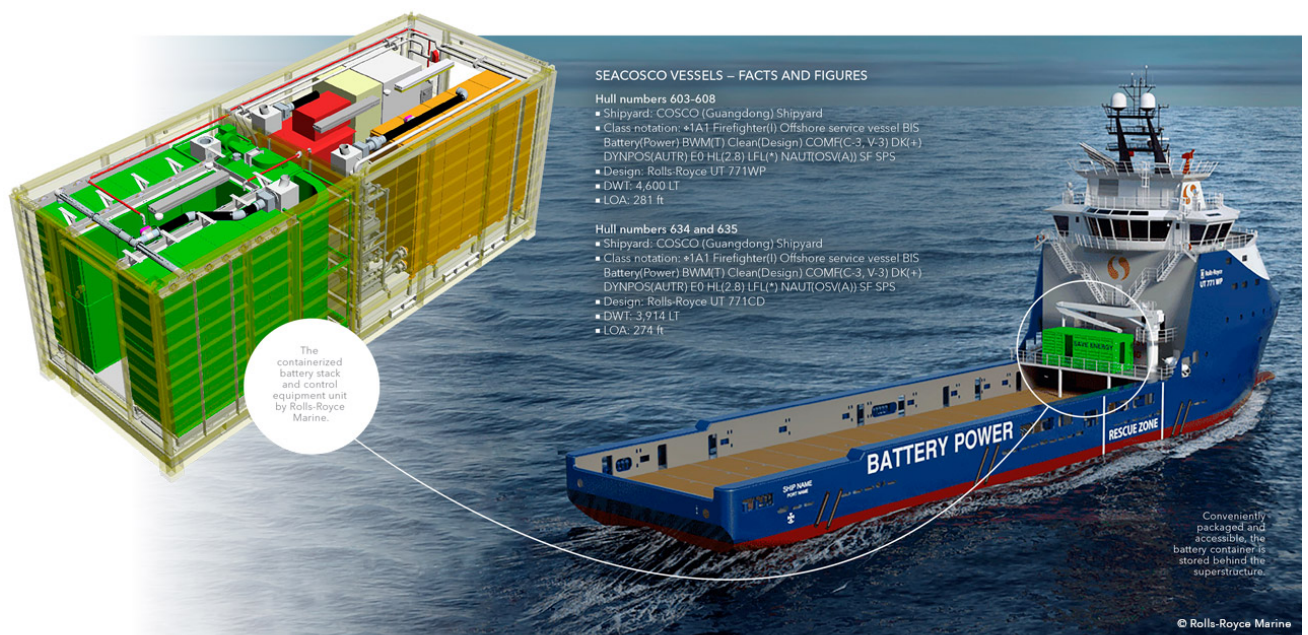


FIGURA 36: Projeto de Implementação de um Pack de Baterias Rolls-Royce num navio de Apoio Logístico (DNV-GL, 2021)

Bibliografia

- Adams, V. W. (1990). Possible fuel cell applications for ships and submarines. *Journal of Power Sources*, 29(1), 181–192. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(90\)80018-9](https://doi.org/10.1016/0378-7753(90)80018-9)
- Proceedings of the Grove Anniversary Fuel Cell Symposium
- Afonso, A. & Nunes, C. (2019). *Probabilidade e Estatística - Aplicações e Soluções em SPSS*. Universidade de Évora. <https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/25959/3/ProbabilidadesEstatistica2019.pdf>
- Akhil, A. (1995). Trends and status of battery energy storage for utility applications. *Proceedings of the Annual Battery Conference*, 273–277. <https://doi.org/10.1109/bcaa.1995.398527>
- Alves, R. N. (2007). *Propulsão Elétrica de Navios* (tese de doutoramento). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Antunes, H. (2014). *O Planeamento como Processo Essencial na Política e na Estratégia - O caso da estratégia nacional para o mar* (tese de doutoramento). ISCSP. Lisboa.
- Arnold, A. S., Wilson, J. S., Boshier, M. G. & Smith, J. (1998). A Simple Extended-Cavity Diode Laser. *Review of Scientific Instruments*, 69(3), 1236–1239. <http://link.aip.org/link/?RSI/69/1236/1>
- Ashour, S. & Ibrahim, A. (2018). A Simple Model of a Ship and Diesel-Electric (DE) Propulsion System, (December).
- Bastos, R. F. (2019). *O potencial do sistema Diesel-Elétrico para a redução do consumo de combustível fóssil em embarcações de pesca* (tese de doutoramento N.º 2). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.
- Bjorn-Johan, V., Sverre, E. & Oystein, A. (2017). Battery-Powered Ships.
- Britannica, T. E. d. E. (2018). Arquitetura Naval. <https://www.britannica.com/technology/naval-architecture>
- Carter, G. & Panziera, E. (2015). Membrane Scrubber Technology SOx Removal from Engine Exhaust. *GreenTech 2015 Conference, Seattle*. <http://www.green-marine.org/wp-content/uploads/2015/06/Carter-Panziera.pdf>
- da Hora, H., Monteiro, G. & Arica, J. (2010). Confiabilidade em Questionários para Qualidade: Um Estudo com o Coeficiente Alfa de Cronbach, 11(2), 85–103.
- Dalton, T. & Mako, C. D. (2020). A Step Toward the All Electric Warship Thomas, 74–75.
- DNV GL. (2020). Energy Transition Outlook 2020 - A global and regional forecast to 2050. *Dnv Gl Energy Transition Outlook*, 306. <https://eto.dnvgl.com/2020/index.html>
- DNV-GL. (2016). GLOBAL SULPHUR CAP 2020 Know the different choices and challenges for on-time compliance, 24.

- DNV-GL. (2021). Seacor goes electric. Obtido 27 agosto 2021, de <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Seacor-goes-electric.html>
- Doerry, N. (2014). The Evolution of the Electric Warship.pdf. *ASNE Naval Engineers Journal*, 126(1), 172–186. <http://www.doerry.org/norbert/papers/EvolutionoftheElectricWarship-nhd.pdf>
- Doerry, N., Amy, J. & Krolick, C. (2015). History and the Status of Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends in the U.S. Navy. *Proceedings of the IEEE*, 103(12), 2243–2251. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2494159>
- EMSA. (2020). Study on Electrical Energy Storage for Ships, (May). <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/item/3906-electrical-energy-storage-for-ships.html>
- Ericson, T., Hingorani, N. & Khersonsky, Y. (2006). PEBB - Power Electronics Building Blocks from Concept to Reality, Em 2006 Record of Conference Papers - IEEE Industry Applications Society 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. <https://doi.org/10.1109/PCICON.2006.359706>
- Facts & Factors. (2020). *Global Electric Vehicles Market Projected to Reach USD 700 Billion By 2026* (rel. téc.). Facts & Factors. <https://www.fnfresearch.com/global-electric-vehicles-market-by-vehicle-type-two-677>
- Fang, S., Wang, Y., Gou, B. & Xu, Y. (2020). Toward Future Green Maritime Transportation: An Overview of Seaport Microgrids and All-Electric Ships. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 207–219. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2950538>
- Feely, R. A., Doney, S. & Cooley, S. (2009). Ocean Acidification: Present Conditions and Future Changes in a High-CO₂ World. *Oceanography*. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.95>
 The uptake of anthropogenic CO₂ by the global ocean induces fundamental changes in seawater chemistry that could have dramatic impacts on biological ecosystems in the upper ocean. Estimates based on the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) business-as-usual emission scenarios suggest that atmospheric CO₂ levels could approach 800 ppm near the end of the century. Corresponding biogeochemical models for the ocean indicate that surface water pH will drop from a pre-industrial value of about 8.2 to about 7.8 in the IPCC A2 scenario by the end of this century, increasing the ocean's acidity by about 150.
- Fridell, E. (2018). *Emissions and Fuel Use in the Shipping Sector*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814054-3.00002-5>
- Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K. & Hopman, J. J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, 194, 30–54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>
- German Shippwners' Association. (s.d.). VDR. Obtido 3 março 2021, de www.reederverband.de

- Hodge, C. G. & Mattick, D. J. (2008). The electric warship then, now and later. *Conference Proceedings of the Institute of Marine Engineering, Science and Technology - INEC 2008: Embracing the Future*, (April), 1–9.
- Hou, J. (2017). Control and Optimization of Electric Ship Propulsion Systems with Hybrid Energy Storage, 177. <https://search.proquest.com/docview/2020837665?accountid=14544>
- IMO. (2006). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships* (I. M. Organization, Ed.; sixth). London, CPI Group (UK).
- IMO. (2020). 4th IMO Greenhouse Gas Study. *Mepc 75/7/15*, 74.
- IPCC. (2021). *Assessment Report 2021* (rel. téc.). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jeong, B., Jeon, H., Kim, S., Kim, J. & Zhou, P. (2020). Evaluation of the lifecycle environmental benefits of full battery powered ships: Comparative analysis of marine diesel and electricity. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/JMSE8080580>
- Kanellos, F. D., Tsekouras, G. J. & Hatziargyriou, N. D. (2014). Optimal demand-side management and power generation scheduling in an all-electric ship. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(4), 1166–1175. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2336973>
- Khaliwala, S., Primeau, F. & Hall, T. (2009). Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. *Nature*, 462(7271), 346–349. <https://doi.org/10.1038/nature08526>
- Kongsberg Maritime. (2020). Autonomous ship project, - YARA Birkeland. Obtido 27 agosto 2021, de <https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland/>
- Koumentakos, A. G. (2019). Developments in Electric and Green Marine Ships. www.mdpi.com/journal/asi
- Łebkowski, A. & Koznowski, W. (2020). Analysis of the Use of Electric and Hybrid Drives on SWATH Ships. *Energies*, 13(24), 6486. <https://doi.org/10.3390/en13246486>
- Lee, D. K., Jeong, Y.-K., Shin, J. G. & Oh, D.-K. (2014). Optimized design of electric propulsion system for small crafts using the differential evolution algorithm. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(3), 229–240. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0029-9>
- Leite, P. P. (2020). Estado da Arte e Análise Comparativa de Sistemas de Propulsão de Emissões RED.
- Levin, K. & Davis, C. (2019). What Does "Net-Zero Emissions" Mean? Obtido 3 fevereiro 2021, de <https://www.wri.org/blog/2019/09/what-does-net-zero-emissions-mean-6-common-questions-answered>
- Lindsey, R. & Dahlman, L. (2021). Climate Change: Global Temperature. Obtido 28 junho 2021, de <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>
- Marine Traffic. (2021). YARA BIRKELAND (Container Ship). Obtido 21 setembro 2021, de https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:6407606/mmsi:257646000/imo:9865049/vessel:YARA%7B%5C_%7DBIRKELAND

- Marinha Portuguesa. (2021a). NRP D. Carlos I. Obtido 21 setembro 2021, de https://www.marinha.pt/pt/os%7B%5C_%7Dmeios/hidrograficos/Paginas/nrp-d-carlosI.aspx
- Marinha Portuguesa. (2021b). NRP Tridente. Obtido 21 junho 2021, de https://www.marinha.pt/pt/os%7B%5C_%7Dmeios/submarinos/Paginas/nrp-tridente.aspx
- Marinha Portuguesa & Equipa de Acompanhamento e Fiscalização dos Navios de Patrulha. (2020). Navios de Patrulha Oceânica II.
- Melo, P. M. A. S. (2017). Aplicação de Motores Síncronos de Ímanes Permanentes e Motores de Indução em Veículos Elétricos. *Neutro à Terra*, (10), 25–31. <https://doi.org/10.26537/neutroterra.v0i10.395>
- Monti, A., D'Arco, S., Gao, L. & Dougal, R. A. (2008). Energy storage management as key issue in control of power systems in future All Electric Ships. <https://doi.org/10.1109/SPEEDHAM.2008.4581218>
- Nations, U. (2019). United Nations Conferences on Trade and Development. Obtido 24 fevereiro 2021, de <https://unctad.org/statistics>
- Neto, S. d. A. (2017). *Análise, Seleção, Dimensionamento de sistema mecânico para transmissão de potência em um conversor de energia de ondas oceânicas* (tese de doutoramento). Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Neves, M. A. S. & Ufrj, P. C. (1999). 20^o Congresso Nacional De Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, 1–8.
- Nishi, Y. (2014). *Past, Present and Future of Lithium-Ion Batteries. Can New Technologies Open up New Horizons?* Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00002-9>
- Niu, H.-c., Zhao, M.-l. & Qin, F.-z. (2017). Study on the Ship Electric Propulsion System and Its Development, Em *Proceedings of the 2017 7th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology (ICASET 2017)*, Paris, France, Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/icaset-17.2017.40>
- Ocean & Climate Platform. (2021). The Ocean, a carbon sink. Obtido 12 fevereiro 2021, de <https://ocean-climate.org/en/awareness/the-ocean-a-carbon-sink/>
- Pereira, N. N. (2007). A Diagnostic of Diesel-Electric Propulsion for Ships. *Ship Science & Technology*, 1(2), 27–42.
- Prof. John W. Chinneck. (1999). How to Organize your Thesis. Obtido 1 dezembro 2020, de <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/thesis.html>
- Profillidis, V. & Botzoris, G. (2019a). *Evolution and Trends of Transport Demand* (1^a ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811513-8.00002-9>
- Profillidis, V. & Botzoris, G. (2019b). Executive Judgment, Delphi, Scenario Writing, and Survey Methods. Em *Modeling of Transport Demand* (pp. 125–161). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811513-8.00004-2>
- Ramalho Marreiros, J. P. & Brandão Correia, P. M. d. S. (2008). *Manual de Manobra do NRP D. CARLOS I* (rel. téc.).
- Reuters. (2016). "What the U.S. should learn from Britain's dying navy". Obtido 26 julho 2021, de <https://www.reuters.com/news/picture/commentary-what-the-us-should-learn-from-idUSKCN10L1AD/1149227383>
- Roh, G., Kim, H., Jeon, H. & Yoon, K. (2019). Fuel consumption and CO2 emission reductions of ships powered by a fuel-cell-based hybrid power source.

- Journal of Marine Science and Engineering*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/jmse7070230>
- Rosinha, A. P. (s.d.). Seminário em Metodologia de Investigação, 1, 32.
- Sauvé, L. R. R. A. (2016). Electric Propulsion: The Future in Warship.
- Sentís, D. D. (2012). Feasibility of Dual - Fuel Engines in Short Sea Shipping Lines.
- Silva Ribeiro, A. (2020). *Modelos do Processo Estratégico* (ISCSP, Ed.). Lisboa, Coleção Estudos Políticos e Sociais.
- SPSS. (2021). IBM.
- Sulligoi, G., Vicenzutti, A. & Menis, R. (2016). All-electric ship design: From electrical propulsion to integrated electrical and electronic power systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(4), 507–521. <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2598078>
- Tang, R., Wu, Z. & Li, X. (2018). Optimal operation of photovoltaic/battery/diesel/cold-ironing hybrid energy system for maritime application. *Energy*, 162(2018), 697–714. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.048>
- Tirschwell, P. (2017). Low sulfur marine fuel rule comes with high price. *JoC Online*. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true%7B%5C%7Ddb=bth%7B%5C%7DAN=124534415%7B%5C%7Dlang=pt-pt%7B%5C%7Dsite=ehost-live>
- Trencher, G. & Edianto, A. (2021). *Drivers and barriers to the adoption of fuel cell passenger vehicles and buses in Germany* (rel. téc. N.º 4). <https://doi.org/10.3390/en14040833>
- Valentin, E. K. (2001). Swot Analysis from a Resource-Based View. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 9(2), 54–69. <https://doi.org/10.1080/10696679.2001.11501891>
- Vitorino, T. V. (2016). *Sistemas de Propulsão Elétrica e Híbrida*.
- Walker, T. R., Adebambo, O., Del Aguila Feijoo, M. C., Elhaimer, E., Hossain, T., Edwards, S. J., Morrison, C. E., Romo, J., Sharma, N., Taylor, S. & Zomorodi, S. (2018). *Environmental effects of marine transportation* (Second Edi). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00030-9>
- Wang, X., Huang, Y., Ji, D., Omenya, F., Karki, K., Sallis, S., Piper, L. F. J., Wiaderek, K. M., Chapman, K. W., Chernova, N. A. & Whittingham, M. S. (2017). Structure Evolution and Thermal Stability of High-Energy- Density Li-Ion Battery Cathode Li₂VO₂F. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(7), A1552–A1558. <https://doi.org/10.1149/2.1071707jes>
- Wen, S., Lan, H., Yu, D. C., Fu, Q., Hong, Y. Y., Yu, L. & Yang, R. (2017). Optimal sizing of hybrid energy storage sub-systems in PV/diesel ship power system using frequency analysis. *Energy*, 140, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.065>
- Whitman, E. C. (2001). Electric Drive: A Propulsion System for Tomorrow's Submarine Fleet? *Sea Power*, 44, 47. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true%7B%5C%7DAuthType=ip,uid,shib%7B%5C%7Ddb=mth%7B%5C%7DAN=4838954%7B%5C%7Dlang=pt-pt%7B%5C%7Dsite=eds-live>
- Whittingham, B. M. S. (2012). History, Evolution, and Future Status of Energy Storage. *Proceedings of the IEEE*, 100, 1518–1534.

- Wieman, C. E. & Hollberg, L. (1991). Using Diode Lasers for Atomic Physics. *Review of Scientific Instruments*, 62(1), 1–20. <http://link.aip.org/link/?RSI/62/1/1>
- Wu, P. & Bucknall, R. (2016). Marine propulsion using battery power. *Shipping in Changing Climates Conference 2016*, 1–10.
- Yang, Z. L., Zhang, D., Caglayan, O., Jenkinson, I. D., Bonsall, S., Wang, J., Huang, M. & Yan, X. P. (2012). Selection of techniques for reducing shipping NOx and SOx emissions. *Transportation Research Part D*, 17(6), 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.05.010>

Apêndice 1- Questionários sobre a Utilização dos Sistemas de Propulsão Elétrica na Marinha Portuguesa

Sistemas de Propulsão Elétrica – Estudo de Viabilidade

Dissertação de Mestrado

26116 ASPOF M Botas Lino

Questionário



Identificação (meramente estatístico):

Posto: _____

Classe: _____

Idade: _____

1. Considera a propulsão elétrica uma mais valia para a missão do seu navio.

(a.) Concordo totalmente;

(b.) Concordo;

(c.) É indiferente;

(d.) Discordo;

Justifique a sua escolha:

2. Assinale qual a classificação mais indicada para a utilização do sistema de propulsão elétrica a bordo do seu navio.

(10 corresponde a “São utilizadas todas as suas potencialidades, em todas as ocasiões possíveis”):

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

3. Na sua opinião, quais as condicionantes que levam a que a propulsão elétrica seja preterida na utilização, no seu navio. Efetue uma breve explicação dos seus motivos;

4. A que regimes de velocidade é utilizado o sistema de propulsão elétrica, a bordo do seu navio?

5. Existe um tipo de missão onde este sistema seja mais utilizado?

6. Quais as principais vantagens que verifica na implementação dos sistemas de propulsão elétrica?

7. Quais considera serem as circunstâncias ou os tipos de missão que mais poderão beneficiar deste tipo de propulsão?

8. Considera que a propulsão elétrica é o futuro nos navios? Vê a possibilidade de estes sistemas ganharem o seu protagonismo em navios combatentes?

9. Com base na sua experiência/opinião, e sabendo que o 1 é o mais importante, ordene as vantagens dos sistemas de propulsão elétrica:

- ☐ Redução de Combustível;
- ☐ Redução da Guarnição;
- ☐ Flexibilidade de Projeto;
- ☐ Aumento da Capacidade de Sobrevivência do Navio;
- ☐ Aumento da vida útil do Navio;
- ☐ Redução dos custos de manutenção;
- ☐ Redução da emissão de poluentes;
- ☐ Redução da assinatura acústica;
- ☐ Flexibilidade na distribuição de potência após a deteção de anomalias/incidentes;
- ☐ Aumento substancial no controlo da velocidade, do binário e na capacidade de reversão da marcha AV/AR;

Muito obrigado pela sua disponibilidade,

Se pretender fazer alguma sugestão em relação ao tema em estudo, ficarei eternamente grato caso possa entrar em contacto segundo os meios alternativos:

- *Botas.lino@marinha.pt*
- *+351 927627764*

Apêndice 2 - Matriz de Validação dos Questionários sobre a Utilização dos Sistemas de Propulsão Elétrica na Marinha Portuguesa

TABELA A1: Matriz de validação dos Questionários efetuados

| | | |
|---|---------------------------|---|
| Compreender a utilidade dos sistemas de propulsão elétrica implementados nos navios | Vantagens | Considera a propulsão elétrica uma mais valia para a missão do seu navio? |
| | | Quais as principais vantagens que verifica na implementação de sistemas de propulsão elétrica? |
| | | Ordene as diferentes vantagens dos sistemas de propulsão elétrica, de acordo com o seu grau de importância? |
| Compreender as atuais limitações dos sistemas elétricos implementados nos navios | Desvantagens e Limitações | Qual o grau de utilização mais indicada do sistema de propulsão elétrica a bordo do seu navio? |
| | | Quais as condicionantes que levam a que a utilização da propulsão elétrica seja preterida no seu navio? |
| | | Quais os regimes de velocidade em que é utilizado o sistema de propulsão elétrica a bordo do seu navio? |
| Compreender as potencialidades da implementação em navios combatentes | Potencialidades | Existe um tipo de missão onde este sistema seja mais utilizado? |
| | | Quais considera serem os tipos de missão que mais poderão beneficiar deste tipo de propulsão? |

Apêndice 3 - Matriz da Análise SWOT

TABELA A1: Matriz de análise SWOT adaptada

| | Ambiente Interno (micro) | Ambiente Externo (macro) |
|------------------------------|--|--|
| | Forças | Oportunidades |
| Fatores Favoráveis | <ul style="list-style-type: none"> • Redução do consumo de Combustível; • Flexibilidade de projeto; • Redução dos custos operacionais e de manutenção; • Redução da emissão de poluentes; • Redundância de sistemas; • Redução da assinatura acústica; • Flexibilidade na distribuição de potência após detecção de anomalias/incidentes; • Aumento da capacidade de sobrevivência do navio; • Aumento de Manobrabilidade; • Redução da Guarnição. | <ul style="list-style-type: none"> • Aproveitar a vantagem competitiva, tomando uma posição na vanguarda dos sistemas de propulsão elétricos e híbridos, aproveitando as vantagens operacionais de ambos os sistemas, correspondendo às restrições ambientais impostas pelos organismos reguladores; • Antecipar o restringimento das medidas de mitigação dos impactos ambientais; |
| | Fraquezas | Ameaças |
| Fatores Desfavoráveis | <ul style="list-style-type: none"> • Baixas velocidades, que limitam o perfil operacional do navio; • Deficiências no projeto provocam diminuição da eficácia do sistema; | <ul style="list-style-type: none"> • O sucesso da implementação de tecnologias com níveis de rendimento bastante superiores, como é o caso da fissão nuclear, apenas acessíveis a grandes potências militares; • O surgimento de tecnologias emergentes, como a fusão nuclear; • Com a viabilidade de sistemas alternativos, o desenvolvimento desta tecnologia pode nunca vir a atingir a maturidade necessária para a sua implementação no setor militar naval. |

Apêndice 4 - Matriz de Correlação entre Itens

| | 1 nó | 2 nós | 3 nós | 4 nós | 5 nós | 6 nós | 7 nós | 8 nós | 9 nós | 10 nós |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1 nó | 1,000 | ,913 | ,913 | ,828 | ,488 | ,547 | ,639 | ,730 | ,430 | ,480 |
| 2 nós | ,913 | 1,000 | 1,000 | ,907 | ,535 | ,612 | ,713 | ,813 | ,530 | ,418 |
| 3 nós | ,913 | 1,000 | 1,000 | ,907 | ,535 | ,612 | ,713 | ,813 | ,530 | ,418 |
| 4 nós | ,828 | ,907 | ,907 | 1,000 | ,589 | ,476 | ,597 | ,713 | ,458 | ,356 |
| 5 nós | ,488 | ,535 | ,535 | ,589 | 1,000 | ,364 | ,312 | ,267 | ,126 | ,064 |
| 6 nós | ,547 | ,612 | ,612 | ,476 | ,364 | 1,000 | ,900 | ,816 | ,577 | ,488 |
| 7 nós | ,639 | ,713 | ,713 | ,597 | ,312 | ,900 | 1,000 | ,907 | ,642 | ,542 |
| 8 nós | ,730 | ,813 | ,813 | ,713 | ,267 | ,816 | ,907 | 1,000 | ,707 | ,598 |
| 9 nós | ,430 | ,530 | ,530 | ,458 | ,126 | ,577 | ,642 | ,707 | 1,000 | ,845 |
| 10 nós | ,480 | ,418 | ,418 | ,356 | ,064 | ,488 | ,542 | ,598 | ,845 | 1,000 |

FIGURA S1: Matriz de Correlação entre Itens. Obtido através de (SPSS, 2021)